

電気通信大学大学院情報理工学研究科

平成 25 年度修士論文

指先への装着を前提とした高品位な摩擦感
呈示のための遭遇型触覚呈示デバイス

学籍番号 1230065

氏名 西村 奈令大

総合情報学専攻 メディア情報学コース

主任指導教員 梶本 裕之 准教授 印

指導教員 市川 晴久 教授 印

提出日 平成 25 年 1 月 30 日（木）

概要

近年バーチャルな空間とのインタラクションにおいて、より質の高い体験の実現を目的として触覚呈示を行うデバイス・システムが数多く提案されている。こうした技術は今や製品レベルでも導入されており、視覚・聴覚に加え「触れる」あるいは「叩く」といったような、触覚にも訴えかけるインタラクティブ体験が気軽に楽しめるようになっている。本研究では指先への表面滑りに起因する摩擦感が物体の操作性に大きく影響を与え、高品位な触覚インタラクションに不可欠な要素になることに着目し、バーチャルな物体を「撫でる」ような感覚を呈示することを目標とした。

摩擦感を構成する要素は外力による力覚と皮膚感覚に分けることができるが、本研究ではポータブルな装置での摩擦感呈示を目指し、皮膚感覚に注目した。この皮膚感覚はさらに、垂直・水平方向の皮膚変形および振動という4つの要素に分けることができる。先行研究では、上記の各要素を呈示するようなデバイス・システムが提案されてきた。しかし、多くは皮膚変形あるいは振動のいずれかを呈示するものであり、再現される摩擦感の帯域が制限されるという問題があった。

そこで本研究では、皮膚変形・振動の両者を実現するという広帯域性と、垂直・水平方向に駆動されるという多方向性を持たせ、平面との接触・非接触状態を再現する遭遇型の方式を採用し、かつ指先への装着を前提とした簡便な触覚提示デバイスを提案する。デバイスにはボイスコイルモータとフィルムを取り付けた2台のDCモータを用いており、前者は垂直方向の皮膚変形および振動を、後者は水平方向の皮膚変形を呈示するためのものである。これにより、摩擦感に起因する皮膚変形と振動の両者を呈示することができる。当初、水平方向の皮膚変形呈示には左右に並進運動するリニアサーボを用いていたが、応答性などの問題からDCモータへと変更した。

また、このデバイスは平面との衝突に起因する振動を再現する遭遇型の機構を含んでいる。先行研究において、指と平面との接触面積が柔軟感の知覚に影響を与えるという報告があることから、本研究で目指すような摩擦感の呈示においても平面との接地・非接地が重要になると考えられる。さらに力覚提示装置を伴わない比較的簡便な実装を実現しているため、ウェアラブルな環境での使用が可能である。

本論文ではまず、第1章から第3章にかけて研究の背景と目的の説明、先行研究の紹介を行い、本研究の立ち位置を示した。第4章ではこの提案に基づいて試作されたデバイスの設計論、動作原理について述べた。第5章ではデバイスの性能・ユーザビリティを実験により検証した。最後にこれまでの議論をまとめ、提案手法の有効性、今後の展望を述べた。

目次

第1章	序論	1
1.1	触覚インタラクションにおける摩擦感の重要性	1
1.2	研究目的	1
1.3	本論文の構成	2
第2章	触覚	3
2.1	皮膚感覚	3
2.2	摩擦感の構成要素	7
第3章	関連研究	9
3.1	皮膚変形の呈示	9
3.2	振動の呈示	13
3.3	遭遇型	15
3.4	皮膚感覚呈示と力覚呈示との組み合わせ	17
3.5	本研究の立ち位置	20
第4章	提案手法	22
4.1	第1、第2 試作デバイス	22
4.1.1	第1 試作 ～簡便性を重視した設計～	22
4.1.2	第2 試作 ～位置検出センサの簡便化～	25
4.2	第3 試作デバイス	27
4.2.1	デバイス概要	27
4.2.2	各アクチュエータの出力の最適化	30
4.2.3	位置センシング	33
第5章	性能の評価	35
5.1	位置検出精度検証	35
5.2	水平方向の応答性の検証	36
5.3	固定された平面の表現	37
第6章	結論	41
	謝辞	42
	参考文献	43

図表目次

図 2.1 ヒトの手掌や足底などの肥厚した皮膚無毛部の断面[38]	4
図 2.2 ヒトの手指皮膚，機械受容ユニットの4型	5
図 2.3 振動閾検出曲線[38]	6
図 2.4 振動覚の閾値[38]	7
図 2.5 摩擦感を構成する皮膚感覚の各要素（左上）平面に指が触れた際に生じる垂直方向の皮膚変形（右上）平面に指が衝突した際に生じる振動（左下）平面上で指を動かそうとした際に生じる水平方向の皮膚変形（右下）平面上で指を動かした際に生じる振動	8
図 3.1 Gravity Grabber[22]	9
図 3.2 3次元方向への皮膚変形を呈示するデバイス[5]	10
図 3.3 2自由度を持つ皮膚変形呈示デバイス[31]	11
図 3.4 皮膚変形を呈示するゲームコントローラ[11]	11
図 3.5 遠隔手術システムにおける皮膚変形の呈示[15]	12
図 3.6 吸引力を利用したペン型デバイス[3]	12
図 3.7 ICPF アクチュエータを用いた振動提示デバイス[18]	13
図 3.8 Vib-Touch[34]	14
図 3.9 粗さ感を変調させるデバイス[1]	14
図 3.10 遭遇型を採用した装置[33]	16
図 3.11 多指遭遇型マスタハンド[24]	16
図 3.12 疑似的な平面形状を呈示する遭遇型デバイス[30]	17
図 3.13 Sylvester らによる触覚呈示機構のパフォーマンス検証実験[32]	18
図 3.14 水平方向に2自由度をもつ触覚呈示機構[35]	18
図 3.15 5自由度をもつ触覚呈示機構[12]	19
図 3.16 固さを増幅させる触覚呈示システム[27]	19
図 3.17 遭遇型触覚呈示機構[19]	20
図 3.18 先行研究まとめ	21
図 4.1 第1試作デバイスの概観	23
図 4.2 第1試作の使用環境イメージ	23
図 4.3 第1試作のシステム構成図	24
図 4.4 第1試作の動作原理（左）非接地の場合（中央）平面に接地した場合（右）接地した状態で指を横にスライドさせた場合	24

図 4.5 第 2 試作デバイスの概観.....	25
図 4.6 第 2 試作のシステム構成図.....	26
図 4.7 第 3 試作デバイス概観.....	28
図 4.8 第 3 試作のシステム構成図.....	28
図 4.9 デバイス使用環境のイメージ.....	29
図 4.10 反射光強度の差分による位置検出 壁に近いほどフォトリフレクタが読み 取る反射光強度は強くなる.....	29
図 4.11 第 3 試作の動作原理（左）非接地の場合（中央）平面に接地した場合（右） 接地した状態で指を横にスライドさせた場合.....	30
図 4.12 デバイスのモデル図.....	33
図 4.13 3 次スプライン補間によって得られた曲線[41].....	34
図 5.1 実験の様子.....	35
図 5.2 位置検出精度検証結果.....	36
図 5.3 応答性検証結果.....	37
図 5.4 実験の様子.....	38
図 5.5 水平方向の動作.....	39
図 5.6 垂直方向の動作.....	40

第1章 序論

1.1 触覚インタラクションにおける摩擦感の重要性

近年の技術の発達により、バーチャル空間を「見る」あるいは「聴く」だけでなく、「触れる」、「叩く」などの触覚的体験が容易に行えるようになった。こうした行為は体験の臨場感を向上させ、ユーザにコンテンツへのより強い没入感を提供する上で重要な要素であると考えられる。

実世界の物体に触れる際、我々はその物体が持つ固さ、粗さ、温かさなどを感じ取ることが出来るが、これらの情報を最も敏感に知覚するのは指先である。指先には神経が高密度に集まっており、体の中のなかで最も重要な感覚器であると言われている。また、13nm の隆起を識別するほどの分解能を持ち[21]、外部の刺激にはきわめて敏感であると言える。また、指先に与える摩擦の大きさの違いが身体の姿勢保持に影響を与えるという報告も存在する[16]。したがって指先への触覚呈示は、バーチャル空間の物体にあたかも触れる、あるいは叩くといったような触覚インタラクションの質を向上させるうえで、不可欠な要素であると考えられる。

これらの触覚インタラクションのうち、本研究では物体を「なぞる」際の感覚に着目した。そのなかでも特に、指先への表面滑りに起因する摩擦感は物体の表面性状のみならず、自己と対象との相対的な運動に関する重要な手掛かりであり、対象物の操作性に直結すると考えられる。したがって、摩擦感を高品位に呈示することによって、バーチャル空間との触覚インタラクションの質がより向上すると言える。この高品位な摩擦感呈示は、例えばロボットハンドによって物体を操作する際に、把持力の適切な強さへの調整を支援し、作業の効率化を促進する、あるいは医師が遠く離れた患者を診察する遠隔医療での触診の際に、皮膚の状態を知る、内部のしこりの有無を判断する等の応用が可能であると思われる。実際、ロボットハンドに取り付けるための触覚センサを設計する際に摩擦感の知覚が重要視されている[8]。

1.2 研究目的

摩擦感の要素には平面からの抵抗力や、平面上で生じる指先の皮膚変形・振動など様々なものが挙げられる。これまでに提案されてきた摩擦感を呈示するためのデバイスは、呈示することのできる要素が限定される、あるいは実装が大がかりかつ複雑になるなどの問題があった。そこで私は、摩擦感の要素を広帯域に再現し、なおかつ指先への装着を前提とした簡便な実装の触覚呈示デバイスを提案する。摩擦感の要素には外力に

よる力覚と皮膚感覚が含まれるが、ここではポータブルなデバイスの実現をめざし、皮膚感覚に注目する。デバイスには垂直・水平方向それぞれに駆動されるアクチュエータを用いている。これにより、垂直・水平方向への皮膚変形並びに振動を呈示することができ、摩擦感の要素を広帯域に再現することができると考えられる。

1.3 本論文の構成

まず第 2 章にて触覚に関する生理学的知見と本研究で定義している摩擦感の構成要素について述べる。特に摩擦の外力による皮膚感覚にどのような刺激が含まれているのかについて説明する。

第 3 章では関連研究の紹介を行う。ここでは、第 2 章で述べたそれぞれの要素が呈示されている事例について述べる。

第 4 章では本研究で提案する手法、およびそれに基づいて製作した触覚呈示デバイスについて述べる。特に、デバイスの設計論やシステム全体の改善点、動作原理などを試作ごとに説明する。

第 5 章ではデバイスの基本的性能およびユーザビリティを検証する。さらに、得られた結果から設計の妥当性や改善すべき点を議論する。

最後に、これまでの議論をまとめ、本論文の結論を示す。

第2章 触覚

一般的に触覚と呼ばれる感覚は生理学的には体性感覚に相当すると考えられる。体性感覚は、体表面に与えられ刺激を知覚する皮膚感覚と、体の各部分の位置、運動の状態、体に加わる抵抗、重量を感知する固有感覚に分類される。本章では体性感覚における生理学および心理学的な基礎的知見について記す。

2.1 皮膚感覚

ヒトの身体表面は皮膚で覆われている。皮膚に刺激が与えられたときに生じる感覚が皮膚感覚である。皮膚の機械的変形は皮膚内部にある機械受容器で受容される。機械受容器内部には、末梢から中枢へと触覚情報を伝える一次求心性神経線維の末端が侵入している。神経生理学の分野では、単一の一次求心性神経線維と、それに結合する機械受容器群の組み合わせを機械受容ユニットと呼ぶ。皮膚に機械的刺激が与えられると、周辺の皮膚組織に歪みが生じる。これを機械受容ユニットが感受し、固有の神経信号が生成され、大部分は脊髄や視床などを經由して大脳の中心溝後部にある中心後回に伝えられる。中心後回の皮質領域（一次体性感覚野）では、あらゆる種類の体性感覚情報が入力され、統合的・階層的な処理が行われる。一次体性感覚野で処理された情報は、二次体性感覚野や頭頂連合野などのより高次の皮質領域での情報処理を経て、運動制御に関与し、あるいは主観的感覚を呼び起こす。

ヒトの皮膚は無毛部と有毛部に分けることができ、ヒトが外界とやりとりする際には、皮膚が肥厚した3つの無毛部である手指、手掌および足底が主要な役割を演じる。そこには、多量の情報を受容するために、機械受容器が集中していて、それらの形態的分類もルフィニ小体を除き明確である。図 2.1 はヒトの手掌や足底などの肥厚した皮膚無毛部の断面を示している。図中記号 Mk, Mr, Pc および R が示す機械受容器メルケル盤、マイスナー小体、ルフィニ小体およびパチニ小体は後に説明する機械受容ユニットの特性にその特徴を大いに反映している。

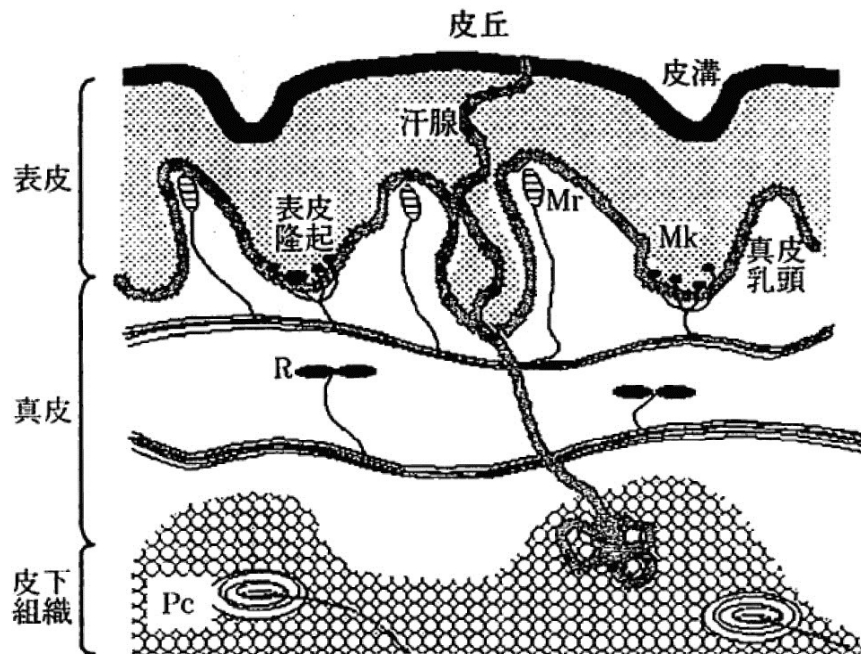


図 2.1 ヒトの手掌や足底などの肥厚した皮膚無毛部の断面[38]

図中の記号 Mk, Mr, Pc および R はそれぞれメルケル盤，マイスナー小体，パチニ小体およびルフィニ小体の存在位置を示している．実際にはパチニ小体が真皮底部にもみられるといったように，Pc および R でかなりの位置変動がある．

メルケル盤 (Merkel disk)

メルケル盤は皮膚下 0.9mm に密に存在する．メルケル盤は，他の 3 つの機械受容器とは構造が異なり，メルケル細胞と神経終末が狭い隙間を挟んで対置する構造となっており，唯一の細胞性受容器である．静的な歪みに応答し，発火頻度はその大きさに比例する．単独の活動では純粋な圧覚を生成する．

マイスナー小体 (Meissner corpuscle)

マイスナー小体は皮膚下 0.7mm に密に存在する．低周波振動 (15～100Hz) に応答し，30Hz で共振する．単独の活動では振動感覚を生成し，パタパタ感を生じる．

パチニ小体 (Pacinien corpuscle)

パチニ小体は皮膚下 2mm 以上の深部にまばらに存在する．高周波振動 (60～800Hz) に応答し，240Hz で共振する．単独の活動では音叉に触れたような振動感覚や指全体のしびれを生成する．

ルフィニ小体 (Ruffini corpuscle)

ルフィニ小体は皮膚下 2mm 以上の深部にまばらに存在する．静的な横ずれに応答し，発火頻度はその大きさに比例する．単独の活動では感覚を生じない．

機械受容ユニットに微小神経電図法を適用し、微細なフィラメントなどを用いて皮膚を軽微に刺激してその活動を調べると、神経発射が記録される刺激位置の集合は、皮膚上に閉じた領域を形成する。この皮膚上領域が機械受容ユニットである。機械受容ユニットは、領域が狭くて境界が鮮明なⅠ型と、領域が広くて境界がはっきりしないⅡ型とに二分される。また領域がプローブで押し込まれた際、プローブの動きに応答する速順応（rapidly adapting: RA または fast adapting: SA）型と、押し込んだ状態でも応答が持続する遅順応（slowly adapting: SA）型に二分される。機械受容ユニットは受容野と順応性によって4つの組み合わせに分類される。各機械受容ユニットの特性には、皮膚および機械受容器の特徴が反映されている。表 2.1 に各機械受容ユニットに対応する機械受容器、各機械受容ユニットの順応性および受容野の大きさを示す。

図 2.2 は4種類の機械受容ユニットの典型的な順応パターンである。それぞれ表 2.1 に示した特性を反映している。

表 2.1 ヒトの手指および手掌無毛部内に投射する4つの機械受容ユニットの特性

機械受容ユニット	対応受容器（推定）	順応性	受容野の大きさ
RA-I	マイスナー小体	速順応，速度感応	3~5mm径の楕円
SA-I	メルケル盤	遅順応，速度 & 圧	3~1mm径の楕円
RA-II	パチニ小体	速順応，加速度感応	少なくとも指全体
SA-II	ルフィニ小体	遅順応，圧（伸展）感覚	SA-Iの約5倍

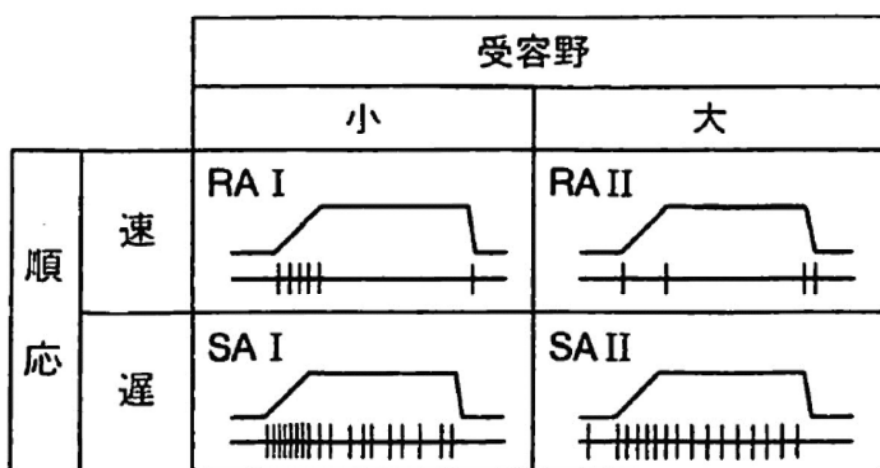


図 2.2 ヒトの手指皮膚，機械受容ユニットの4型
それぞれについて，上は刺激（皮膚変形）の，下は神経インパルス発射の経過を示す。

マスキング刺激，皮膚の冷却，刺激プローブの形状変化などを巧妙に組み合わせた心

理物理実験によって、4つの振動閾検出曲線が発見された。4種類の振動検出チャンネルがあるという意味で、4チャンネル・モデルと呼ばれるが、これらは前述の4つの機械受容ユニットに対応している。図 2.3 に4つの振動閾検出曲線を示す。

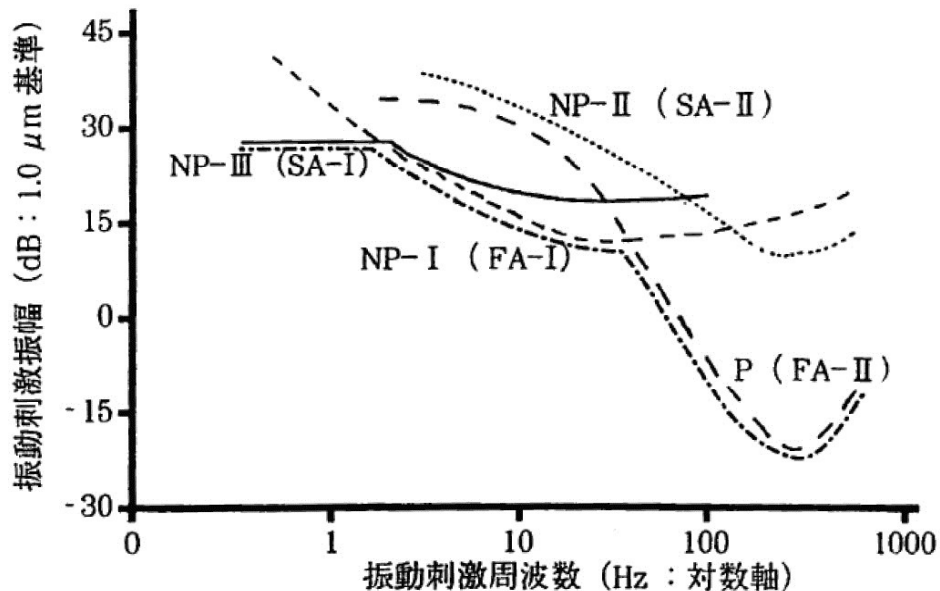


図 2.3 振動閾検出曲線[38]

心理物理的計測法により求められた4種の振動感応曲線。図中のPはパチニを、NPは非パチニを意味する。括弧内は、対応すると考えられている機械受容ユニット、少し下方にずらして描かれている4つの曲線の下側包絡線が、通常のヒトの振動感応曲線となる。

触れている対象が振動しているかどうかの感度が触振動覚であり、触覚によるものは地震や乗車時のゆれなど体全体で受けるものとは区別される。触振動覚の閾値は皮膚に振動子を呈示した際の最小の振幅で示される。測定条件の多くは機械的振動子を正弦波で駆動することで調べられる。

振幅による閾値を縦軸に、横軸を周波数で示すと250Hz付近が底になる(すなわち、閾値が最も低くなる)U字型特性を示す。図 2.4 は0.4~500Hzの周波数範囲で正確に調べた結果である。この図は、触受容器の3Hzまでの超低周波帯域、続く3Hzから40Hzまでの帯域、それ以上の高帯域における機械受容器の応答を感覚閾に反映させている。

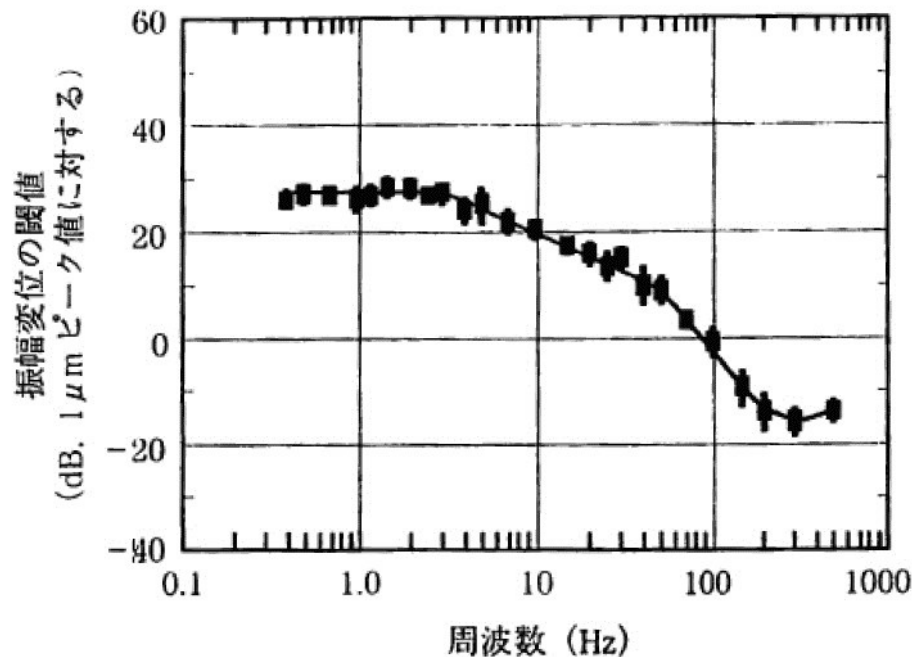


図 2.4 振動覚の閾値[38]

指先部における振動覚の閾値が 250Hz 近辺を底にする U 型特性を示すデータである。縦軸は 1 μ m ピークの振幅を基準にして、それよりどのくらいの変位を加えれば振動を感じるかを、横軸の各振動周波数に対して dB で閾値として表した。

2.2 摩擦感の構成要素

本研究における摩擦感を構成する皮膚感覚は、①指が平面に触れた際に生じる垂直方向の皮膚変形、②指が平面に衝突した際に生じる振動、③指を平面上で動かそうとした際に生じる水平方向の皮膚変形、④指を平面上で動かした際に生じる振動の 4 つに分けられると考えられる (図 2.5)。第 4 章以降ではこれらを呈示するための最適な手法について検討していく。

ここで、①、③で示したような皮膚変形は、メルケル細胞及びルフィニ終末が発火する機械的刺激である。この受容器は静的な歪みや横ずれに応答するため、これによって皮膚変形の方角性を知覚することができる。一方、②、④のような平面上で発生する振動は数十～数百 Hz の高周波であり、マイスナー小体及びパチニ小体が発火する周波数帯域である。このとき、皮膚には微小な皮膚変形が発生しているが、その方向性までは特定することができない。実際、垂直方向の振動を与えた平面を指でなぞった際に、横方向の抵抗力を感じたという報告がある[39]。

したがって、ヒトの指先に摩擦感を呈示する際は振動の方向性は考慮する必要がない

と考えることができ、この知見から製作するデバイスの機構も簡便化できると言える。

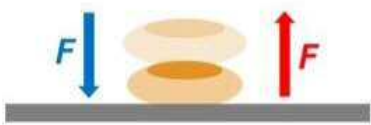
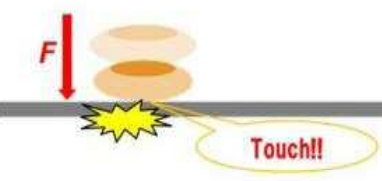
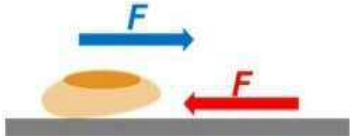
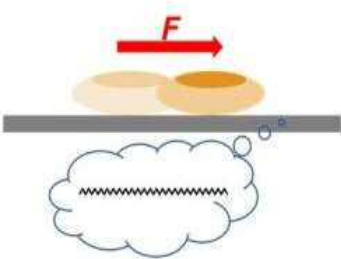
	Skin deformation	Vibration
Vertical		
Tangential		

図 2.5 摩擦感を構成する皮膚感覚の各要素 （左上）平面に指が触れた際に生じる垂直方向の皮膚変形 （右上）平面に指が衝突した際に生じる振動 （左下）平面上で指を動かそうとした際に生じる水平方向の皮膚変形 （右下）平面上で指を動かした際に生じる振動

第3章 関連研究

3.1 皮膚変形の呈示

皮膚変形を呈示するポータブルデバイスは、主に疑似的な力覚や方向、あるいは平面の形状を呈示することを目的に提案されてきた。

Minamizawa ら[22]は、モータでベルトを巻き取る簡便なデバイスによって皮膚変形を発生させ、摩擦感のうちの主に低周波成分である力覚を方向も含めて呈示し、グラスの内容物の重量感などを再現することに成功している。同時に、固有受容感覚が働かない状況でも皮膚変形のみで重量感の変調が引き起こされることを報告している（図 3.1）。これは言い換えれば、呈示される皮膚変形を疑似的な力覚として解釈したと考えられ、本節で後述するデバイスにも同様のことが言える。Chinello ら[5]は小型のモータを3つ用いた装着型のデバイスによって3次元への皮膚変形を呈示し、疑似的な曲面を再現することに成功している（図 3.2）。このデバイスののちに Prattichizzo ら[26]によって別の実験が行われ、その有効性が示された。彼らはバーチャルな細胞組織に針を貫通させずに当てるというタスクを行わせ、力覚提示の場合に比べて皮膚感覚呈示によって正しくタスクが行われたと報告している。これらの例は前章で述べた摩擦感の要素に当てはめると、垂直・水平方向の皮膚変形を呈示していると言える。

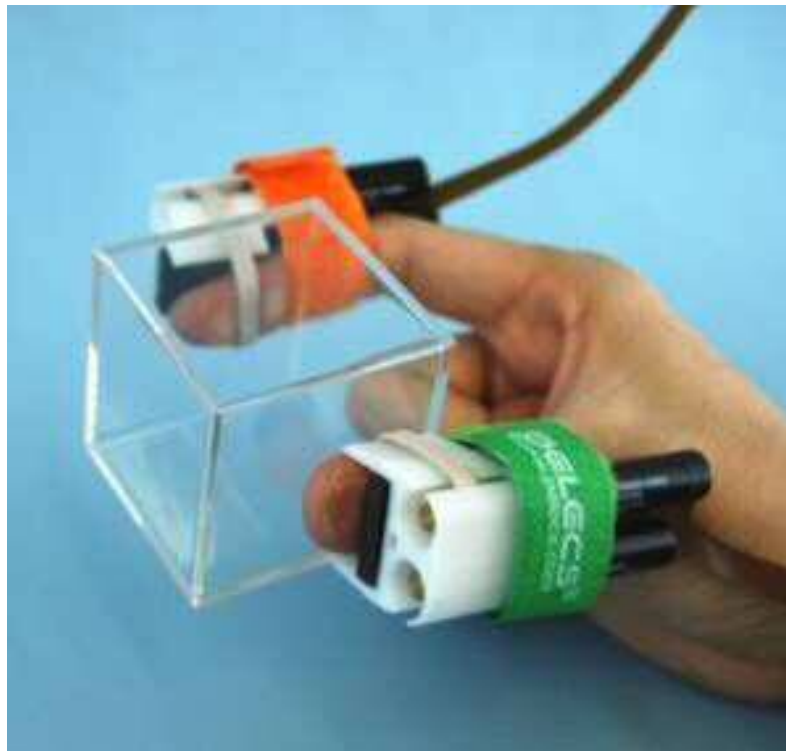


図 3.1 Gravity Grabber[22]

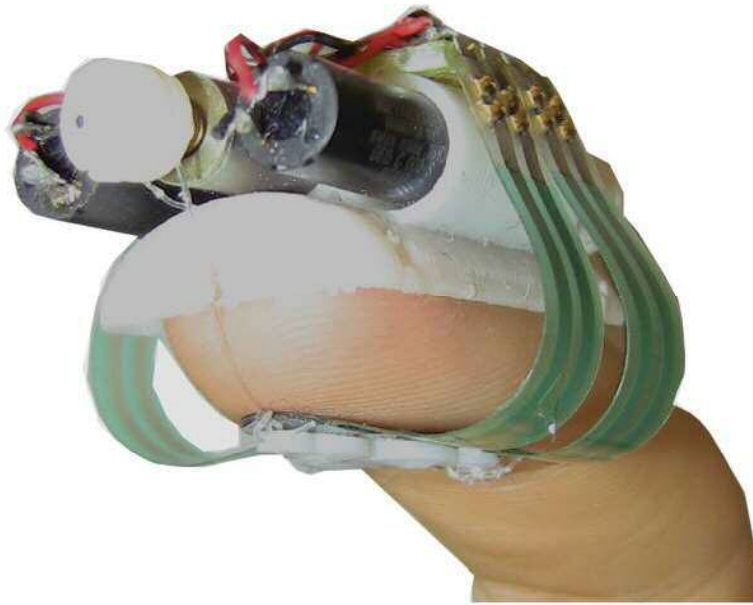


図 3.2 3次元方向への皮膚変形を呈示するデバイス[5]

Massimiliano らは提案した形状記憶合金アクチュエータによって刺激子を2次元平面上で駆動させる手法を提案している[31]. このデバイスはモータを用いる場合よりも軽量でありながら、疑似的な力覚を提示するのに十分な皮膚変形を発生させている. Guinan らは皮膚変形を呈示する機構をジョイスティックに組み込んだコントローラを提案している[11]. 彼らは、皮膚変形を与えることによってユーザに方向を正確に呈示することが可能となり、ゲーム体験におけるパフォーマンスが上昇することをユーザテストによって確認している[13]. また、こうした皮膚変形の呈示は医療現場において手術のパフォーマンスを向上させる効果的な要素であると考えられており、遠隔手術システムのマスタコントローラに皮膚変形を呈示する機構が含まれている[15]. これらは、水平方向への皮膚変形を呈示している例であると考えられる.

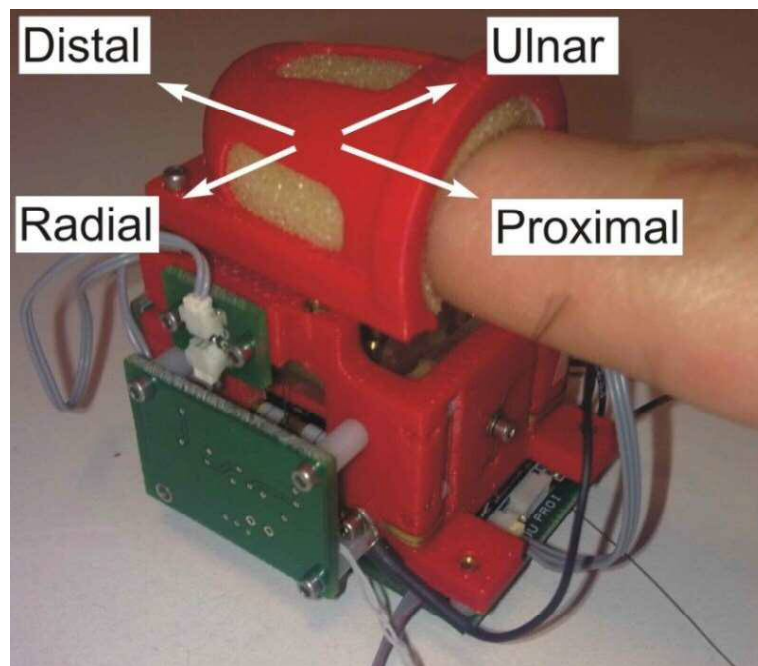


図 3.3 2 自由度を持つ皮膚変形呈示デバイス[31]



図 3.4 皮膚変形を呈示するゲームコントローラ[11]

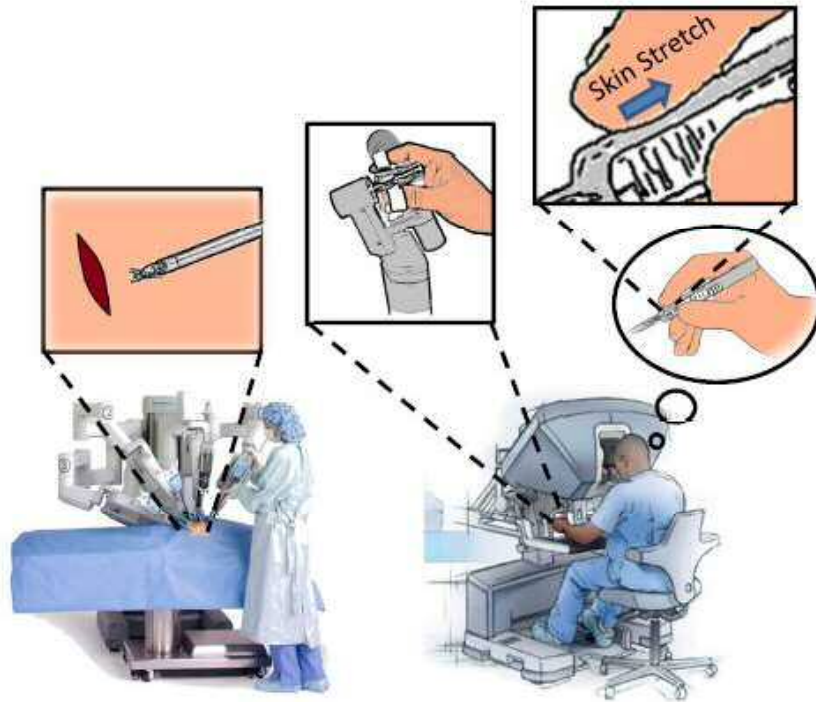


図 3.5 遠隔手術システムにおける皮膚変形の呈示[15]

Ben Porquis ら[3]はペン型のデバイス（図 3.6）に空気によって親指と人差し指の皮膚の吸引を行う機構を取り付け、接地面に取り付けられたバネの硬さの知覚に影響を与えたと報告している。これは、垂直方向の皮膚変形を与えた例であると考えられる。

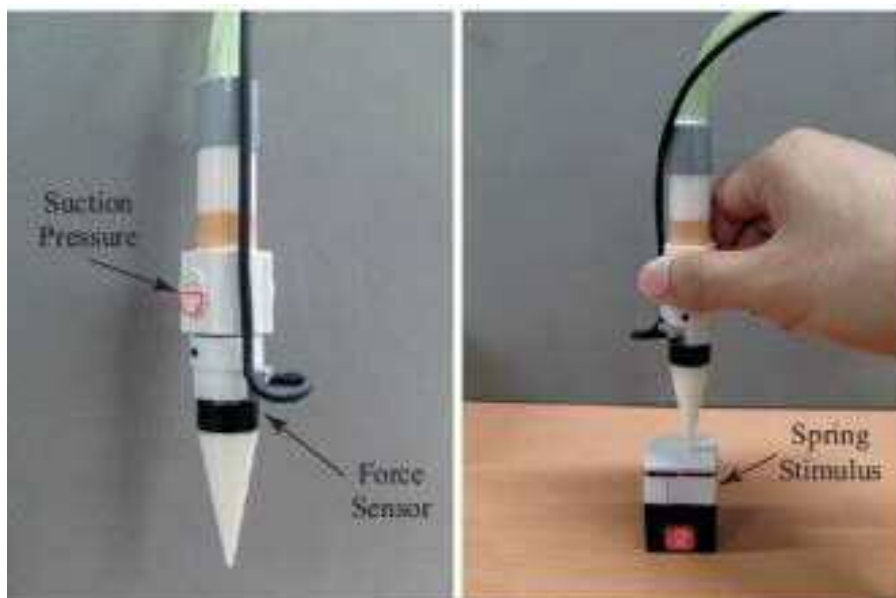


図 3.6 吸引力を利用したペン型デバイス[3]

3.2 振動の呈示

振動を呈示するポータブルデバイスは、主に表面性状すなわちテクスチャ感の再現を目的に行われてきた。多くは振動子による機械的な振動呈示を用いているが、ほかにも高分子ゲル（ICPF）アクチュエータによるもの、静電気によるものなど多くの手法が提案されている。

まず振動子による呈示について、製品としては CyberTouch[6]が各指への振動提示を行っている。Tsuchiya ら[34]はポインティングスティックにボイスコイルを内蔵し、画面上のカーソルがバーチャル空間の物体に触れた際の間隔を呈示する「仮想能動触（Virtual Active Touch）」を実現するデバイスを提案している（図 3.8）。また、Asano ら[1]は様々な素材を貼り付けた板を振動させることによって、素材が持つ粗さ感を変調させることに成功している（図 3.9）。

次に、ICPF アクチュエータによる呈示について、昆陽ら[18]は、ICPF アクチュエータを用いた指先へ装着するタイプのデバイス（図 3.7）により振動成分を呈示しており、これにより無意識の把持力調整が行われることを見出している。

3つ目に静電気による呈示について、Bau ら[2]は静電気力によって生じる振動を用いて、画面上に映った素材のテクスチャ感を再現するアプリケーションを実現している。これと同様の提案は Meyer ら[22]によってもなされている。彼らはテクスチャ感の再現だけでなく、呈示する振動の周波数とユーザが知覚する力の強さの間に相関があることを実験によって確かめている。これらは平面上での指の運動に起因する振動を呈示している例であると言える。

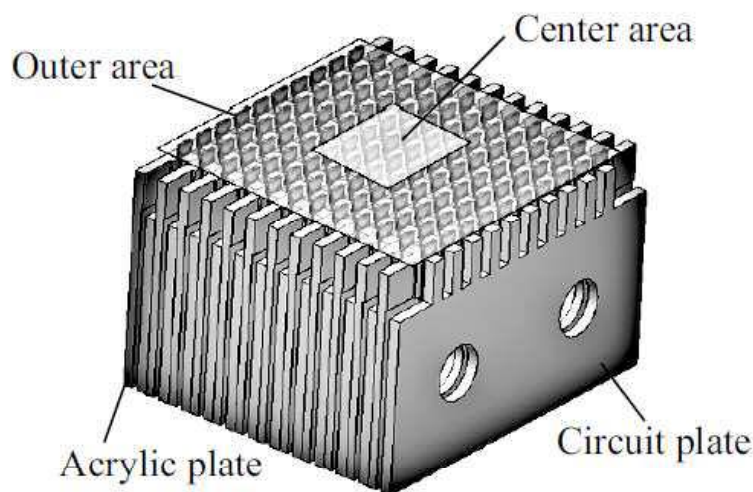


図 3.7 ICPF アクチュエータを用いた振動提示デバイス[18]



図 3.8 Vib-Touch[34]

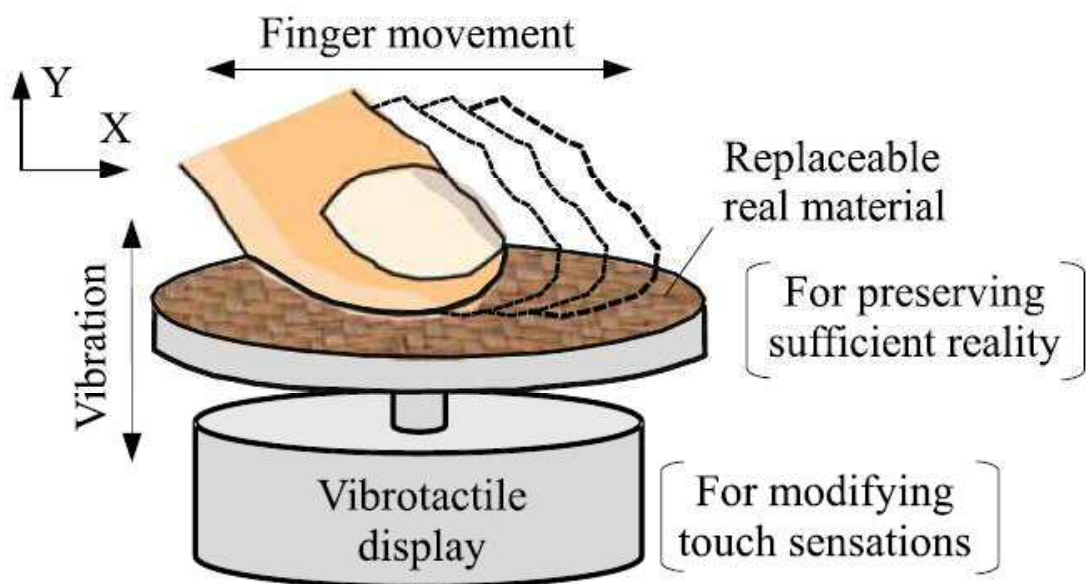


図 3.9 粗さ感を変調させるデバイス[1]

3.3 遭遇型

前節まで述べてきたポータブルな皮膚感覚呈示装置の多くは、皮膚変形あるいは振動のいずれかのみを呈示している。しかし例えば代表的な摩擦現象である stick-slip では、皮膚変形に続き高周波振動が生じることから、皮膚変形と振動の両者を呈示することは高品位な摩擦感呈示に必須であると考えられる。また、従来提案されてきた多くのものは「装着型」である。すなわち装着している間皮膚とデバイスが接触し続けるため、常に触覚が呈示され続ける。しかし、皮膚と対象との接触面積自体が触覚の一要素である柔軟感に寄与しているという観察があり[4][9][4]、また物理的な摩擦に接触面積が寄与することが知られていることと合わせると[25]、摩擦感呈示においても平面との接触面積、ひいては接触の有無が手掛かりになっている可能性がある。

平面との接触の有無を含めて呈示する触覚呈示手法は遭遇型と呼ばれ、接触瞬間の衝突に起因する高周波成分を高品位に呈示できる方式として知られている。この方式は、ロボットアームの先端を適切に制御することによってあたかもバーチャルな物体に触れているかのような感覚を呈示する装置などに応用されている[33][36] (図 3.10)。一般に遭遇型による呈示はシステムが大がかりになる傾向があるが、Nakagawara ら[24]は遭遇型の方式によって触覚呈示を行う多指マスタハンドを提案している (図 3.11)。Sollazzi ら[30]は疑似的な平面形状を呈示する遭遇型の触覚呈示デバイスを提案しており (図 3.12)、Frisoli ら[7]の実験によって皮膚感覚のみで形状を識別可能であると報告している。これらの手法は、垂直方向の皮膚変形および振動を呈示している例であるといえる。

この方式を採用したシステムは多くが高コストであり、また鉛直方向の呈示のみ行っているため、摩擦感呈示としては自然であるといえない。実際、Sylvester らは摩擦感の呈示にはせん断方向の皮膚変形が重要であると報告している[32]。

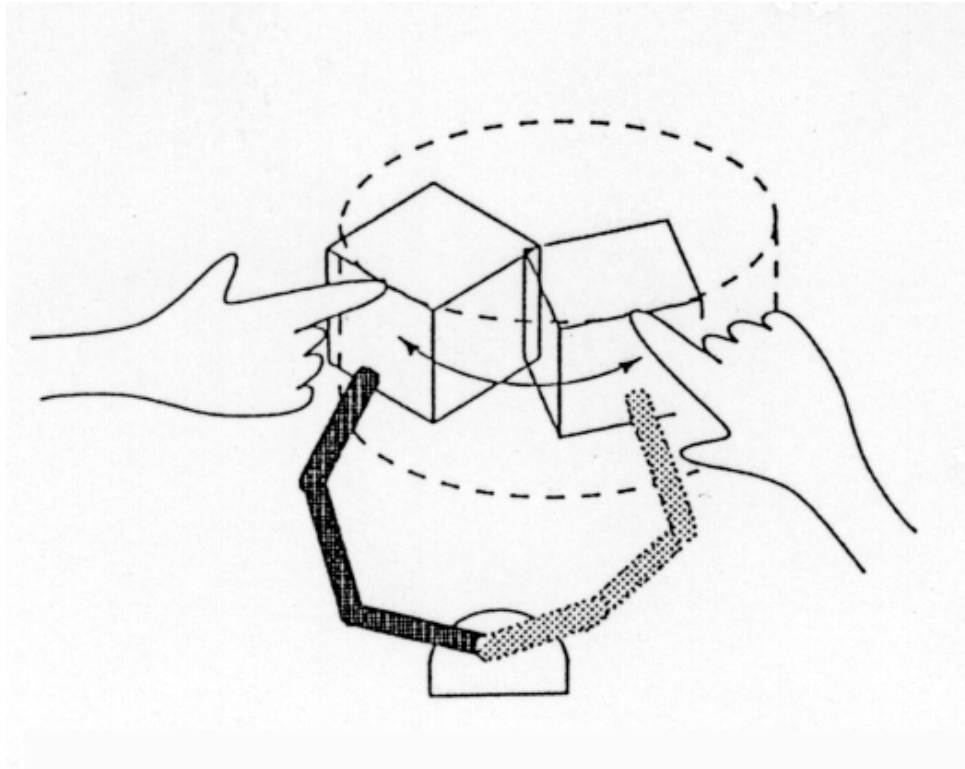


図 3.10 遭遇型を採用した装置[33]

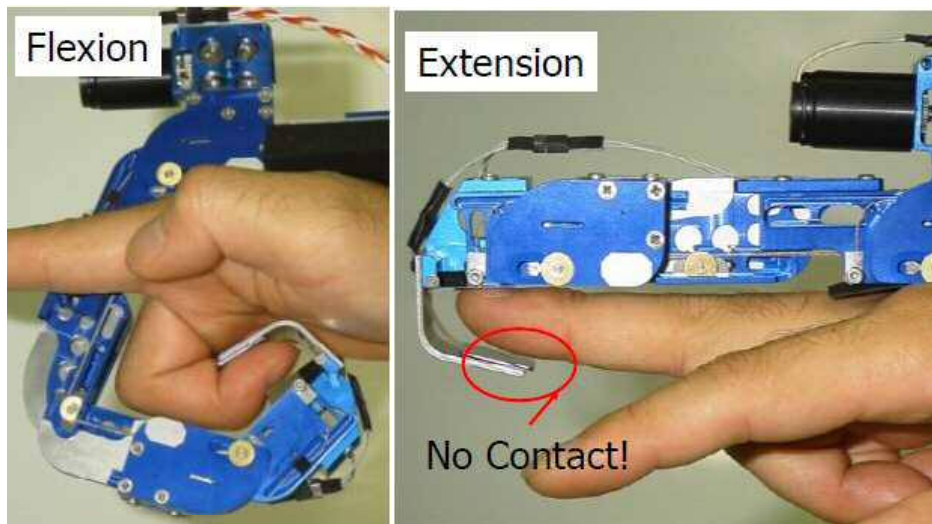


図 3.11 多指遭遇型マスタハンド[24]

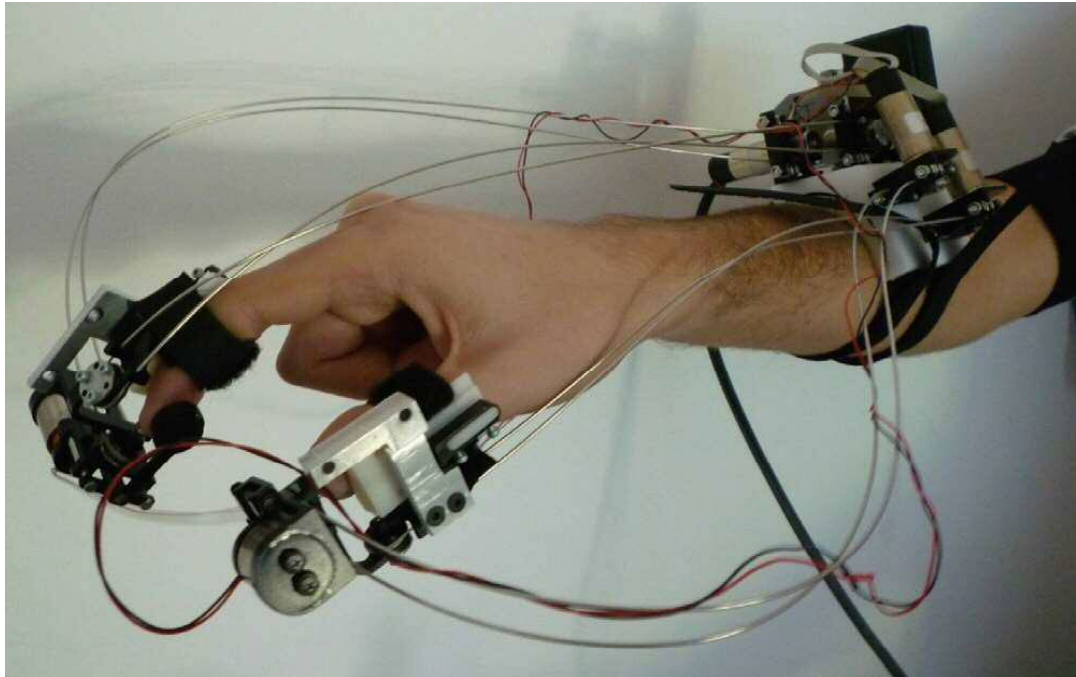


図 3.12 疑似的な平面形状を呈示する遭遇型デバイス[30]

3.4 皮膚感覚呈示と力覚呈示との組み合わせ

3.1, 3.2 節で述べたような皮膚感覚を呈示するデバイスは、平面上での指に対する皮膚変形や振動は再現することができるが、抵抗感を感じるほどの反力を呈示することはできない。一方、PHANToM[37]などに代表される力覚提示装置はユーザの動きが止まるような反力を呈示することが可能である。また、抵抗感・振動の皮膚感覚の呈示が不可能であるため、呈示される力覚を摩擦であると解釈しづらい。そこでいくつかの先行研究では力覚提示装置の先に触覚呈示機構を取り付け、互いの欠点を補うことで皮膚感覚・力覚の両者を呈示するシステムが提案されている。

例えば Kuchenbekker ら[19]は力覚提示装置のアームの先にワイヤの押し引きによって接触子を操作し、水平方向への皮膚変形のほか平面との接地・非接地を呈示するデバイスを提案している。彼女らはこの機構により、バーチャルな平面に指を接地させるという状況を視覚的・触覚的に呈示し、接地した状態を保ったまま指を水平方向に動かし目的地に移動させるというタスクにおいて、視覚的なフィードバックのみの場合よりも両者を組み合わせた場合において遂行時間が減少したと報告している。その後 Sylvester ら[32]によって別の実験が行われ、摩擦に起因する力覚と共に皮膚変形を呈示することによって、力覚のみの呈示の場合よりも強く摩擦感を知覚するということが分かった。

(図 3.13)。Yazidan ら[35]はこの機構を改良した新たな触覚呈示機構を開発し、前後左

右の水平4方向への皮膚変形呈示を可能にしている（図 3.14）。彼らはさらに、力覚と皮膚感覚を組み合わせることによって、より現実性の高い触覚呈示が可能であることを実験に参加した被験者の内観報告から見出している。また、Guinan ら[12]は前後・上下の2軸に加え、ロール・ピッチ・ヨーの3軸への方向呈示が可能な皮膚変形呈示デバイスを実現している。彼らはこれを力覚提示装置に取り付けて使用することで、ねじを壁に埋め込むという体験が可能なアプリケーションを実現している（図 3.15）。Quek ら[27]は把持したスタイラスに力覚を加え、同時に水平方向の皮膚変形を加えると、力覚提示のみの場合よりも固さを感じるようになることを報告している（図 3.16）。これらの例は、前章で述べた摩擦感の構成要素を複数あるいは全て呈示していると考えられる。

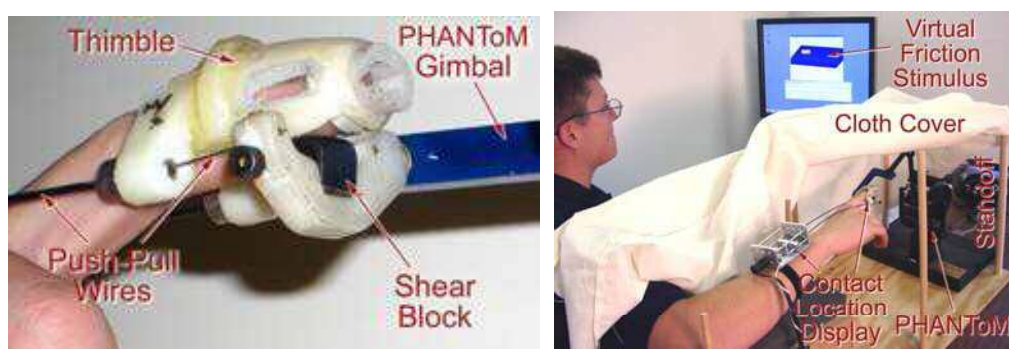


図 3.13 Sylvester らによる触覚呈示機構のパフォーマンス検証実験[32]

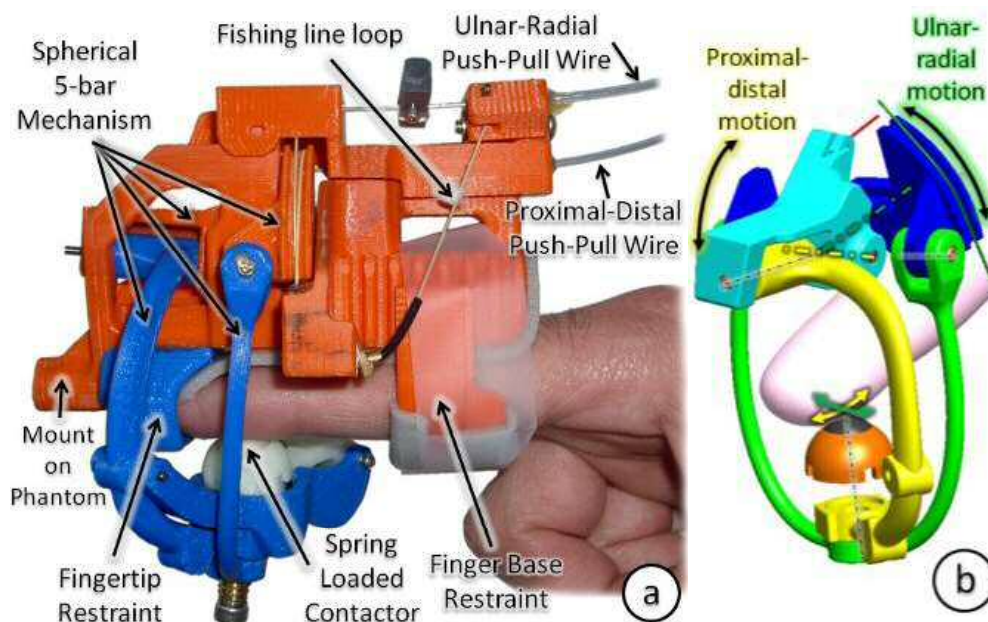


図 3.14 水平方向に2自由度をもつ触覚呈示機構[35]

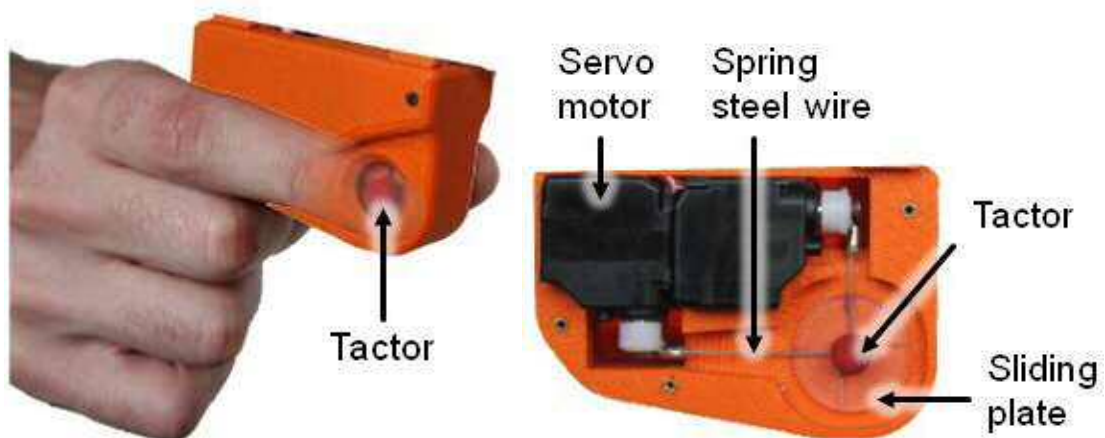


図 3.15 自由度をもつ触覚呈示機構[12]

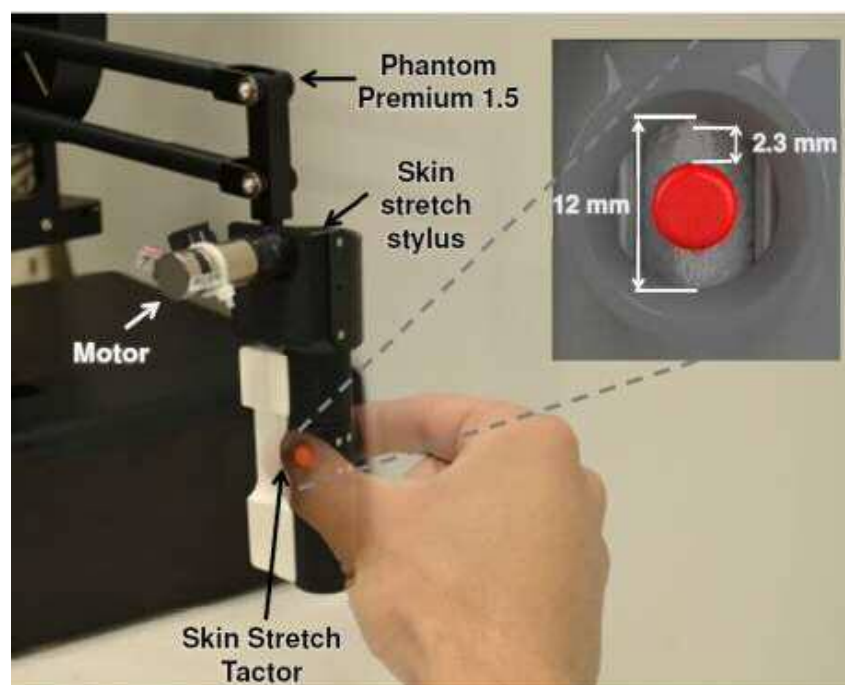


図 3.16 固さを増幅させる触覚呈示システム[27]

Kuchenbekker ら[19]は PHANTOM のアームの先に遭遇型触覚呈示機構を取り付け、様々な種類の局面を呈示することに成功している（図 3.17）。こちらは垂直方向の振動と皮膚変形を呈示している例であり、前節で述べた遭遇型マスタハンドに比べて簡便な機構を実現できていると考えられる。

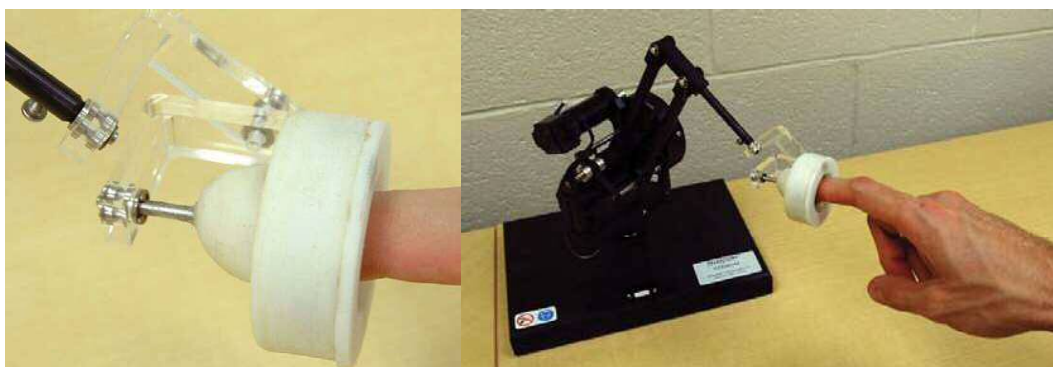


図 3.17 遭遇型触覚呈示機構[19]

3.5 本研究の立ち位置

これまでに挙げた先行研究を呈示要素ごとにまとめた図を図 3.18 に示す．3.1, 3.2 節で述べたような皮膚変形もしくは振動のいずれかを呈示するデバイスは簡便な実装を実現することができているものの、呈示する摩擦感の要素が限定される、つまり表現することができる摩擦感の帯域が限られるという問題点があった．一方、3.4 節で挙げたような力覚提示装置のアームに取り付ける触覚呈示機構の例は、呈示する要素を互いに分け合い、結果として皮膚変形と振動の両者を呈示することに成功している．これにより、摩擦感の要素の限定という問題を解決し、摩擦感の帯域を広げることができるようになったと考えられる．しかしこうしたシステムは設置が大がかりになるケースが多く、複雑な機構を持つため、使用する場面は限られると言える．

これらの事をまとめると、摩擦感を広帯域に呈示しながらも使用環境が限定されないためには、デバイスが皮膚変形と振動の両者を呈示でき、かつウェアラブル型であることが重要であると考えられる．さらに、3.3 節で述べたように指先の接触面積が摩擦感の知覚に影響を与える可能性を考えると、デバイスには遭遇型の機構を取り入れることも重要であると考えられる．次章以降ではこのようなデバイスの設計論について述べていく．

先行研究の事例	垂直方向の 皮膚変形	垂直方向の 振動	水平方向の 皮膚変形	水平方向の 振動
① Minamizawa et al.[23], Chinello et al.[5], Prattichizzo et al.[26]	○	×	○	×
② Sollazzi et al.[31], Guinan et al.[11]	×	×	○	×
③ CyberTouch[6], Konyo et al.[18], Tsuchiya et al.[34], Asano et al.[1], Bau et al.[2], Meyer et al.[22]	×	×	×	○
④ Tachi et al.[33], Nakagawara et al.[24], Solazzi et al.[30]	○	○	×	×
⑤ Kuchenbekker et al.[19], Sylvester et al.[32], Guinan et al.[13], Quek et al.[27]	○	○	○	○

①: 皮膚変形(垂直・水平)の呈示 ②: 皮膚変形(水平)の呈示
 ③: 振動の呈示 ④: 遭遇型 ⑤: 皮膚感覚呈示と力覚呈示の組み合わせ

図 3.18 先行研究まとめ

第4章 提案手法

前章までの議論に基づき、指先への摩擦感呈示を現在よりも高品位に実現するためには次の 3 点が重要であると考えられる。

- (1)広帯域性：皮膚変形と振動を幅広い帯域で実現すること
- (2)多方向性：垂直のみならず水平方向にも力を呈示すること
- (3)遭遇型：デバイスが遭遇型であること

そこで私は、従来から実現されてきた皮膚変形に加え平面との接地条件および垂直・水平方向の反力を再現することのできるデバイスを提案してきた。このデバイスは遭遇型でありながらせん断方向の皮膚変形を呈示することができる。本章ではこの提案に基づいて製作したデバイスおよびその動作原理について述べる。

4.1 第 1、第 2 試作デバイス

4.1.1 第 1 試作 ～簡便性を重視した設計～

図 4.1に提示装置の外観を示す。本装置は垂直方向に振動するボイスコイルモータ (VCM) (LA08-10-000A、BEI KIMCO MAGNETICS社製) と水平方向に駆動されるリニアサーボ (Single Linear Servo、2.4GHz、Super Micro Systems社製) から構成される。これはラジコン飛行機の尾翼の制御等に用いられるものである。前者は皮膚の接地・非接地条件を実現すると共に摩擦によって生じる振動を呈示し、後者は指先に水平方向の皮膚変形を起こすことによって摩擦感の一要素である抵抗力を呈示する。装置上部には指が装置から外れないようにキャップが設置されている。使用環境のイメージを図 4.2に示す。デバイスには磁気センサ (LIBERTY240/8, Polhemus社製) が取り付けられ、位置情報に基づいてそれぞれのアクチュエータが駆動される。図 4.3のシステム構成図に示すように、磁気センサで読み取った位置情報がPCを介してマイクロコントローラ (mbedNCP LPC 1768, NXP Semiconductors) に送られる。

本試作システムではVR空間中の水平な平面との触覚的インタラクションを実現している。指先の垂直位置の値が平面の高さ以上だと接触子は皮膚に触れないが、それ以下になると VCM が駆動されて接触を開始する。さらにその状態で指先位置が水平方向に移動すると指の進行方向とは逆向きにリニアサーボが駆動され、摩擦に起因する皮膚変形が表現される(図 4.4)。以上の仕組みにより、ユーザはバーチャル平面からの摩擦を感じることができると考えた。

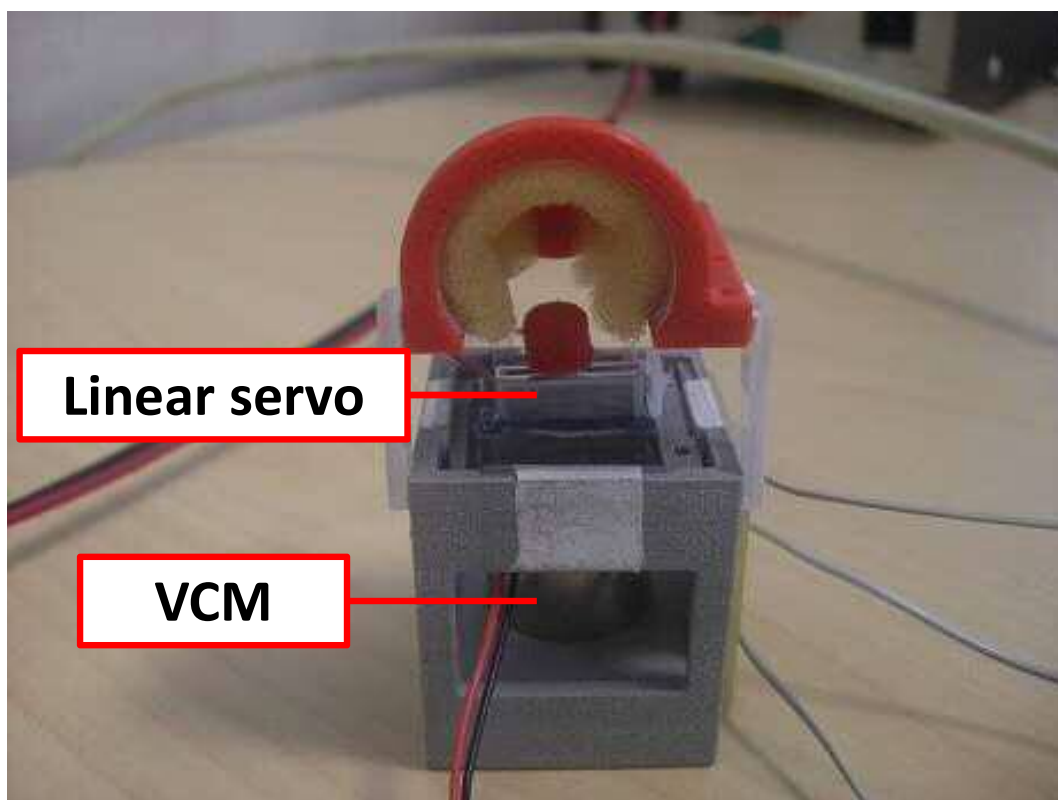


図 4.1 第1 試作デバイスの概観

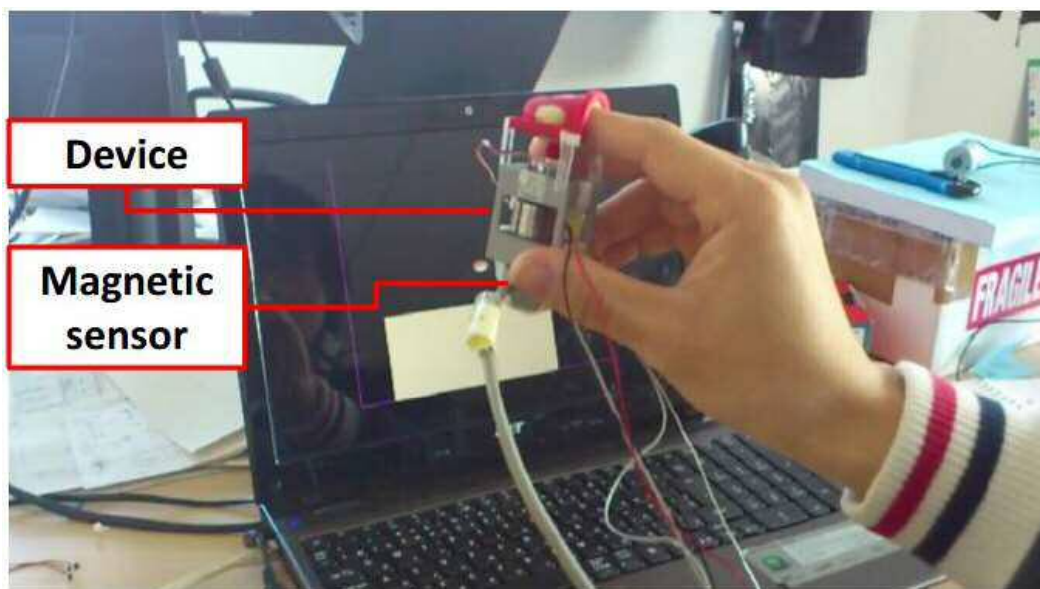


図 4.2 第1 試作の使用環境イメージ

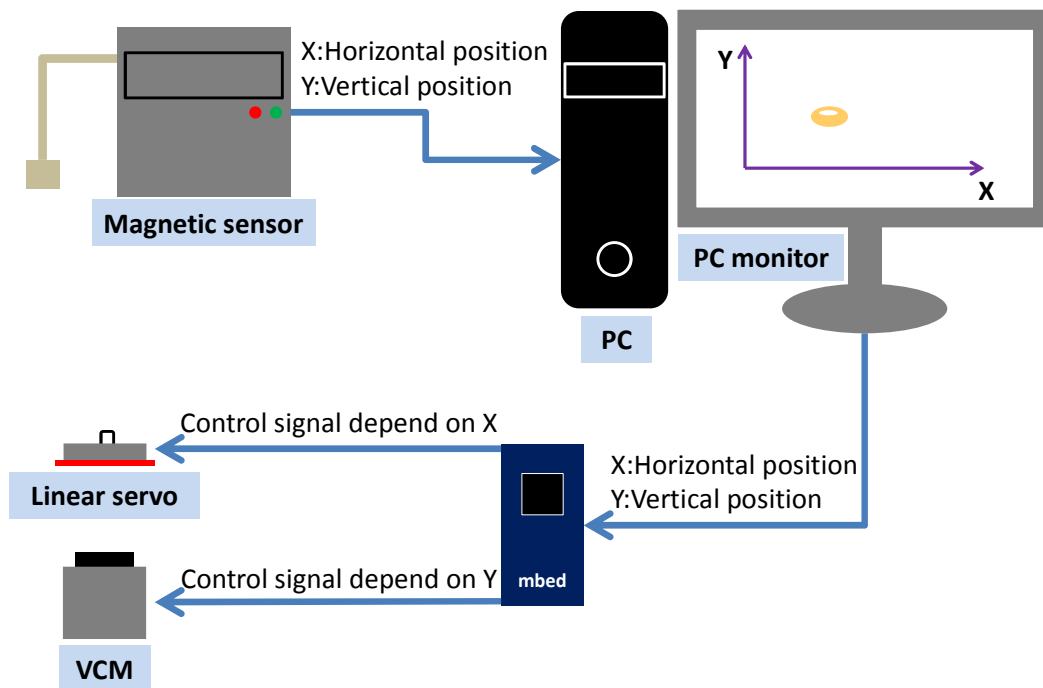


図 4.3 第 1 試作のシステム構成図

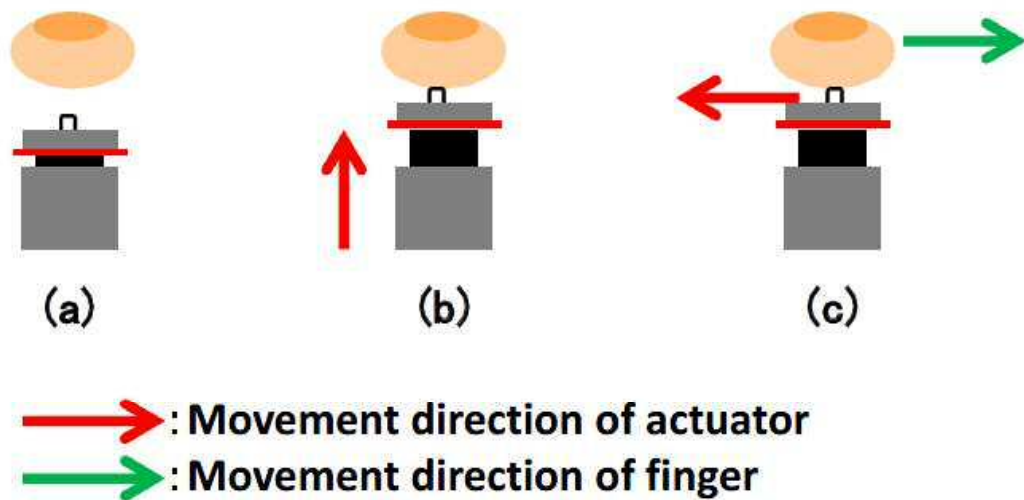


図 4.4 第 1 試作の動作原理 (左) 非接地の場合 (中央) 平面に接地した場合 (右) 接地した状態で指を横にスライドさせた場合

しかし、本システムで用いている磁気センサは非常に大型のもので、本研究の目標の一つであるシステムのポータビリティ性にそぐわないものであった。また、金属によって磁場に乱れが発生し、誤動作が多く見受けられたため、位置センシング方式の再検討が課題となった。

4.1.2 第 2 試作 ～位置検出センサの簡便化～

前項で問題となった点を踏まえ、新たなデバイスを試作した（図 4.5）。ここでは位置検出方法を変更し、赤外 LED からの光を Wii リモコンによってセンシングし、この情報を位置情報として PC 上の描画されたグラフィックに反映させる方式をとった（図 4.6）。その他の機構・動作原理は第 1 試作と同様である。これにより前項で問題となっていたポータビリティの欠如が改善されると考えた。

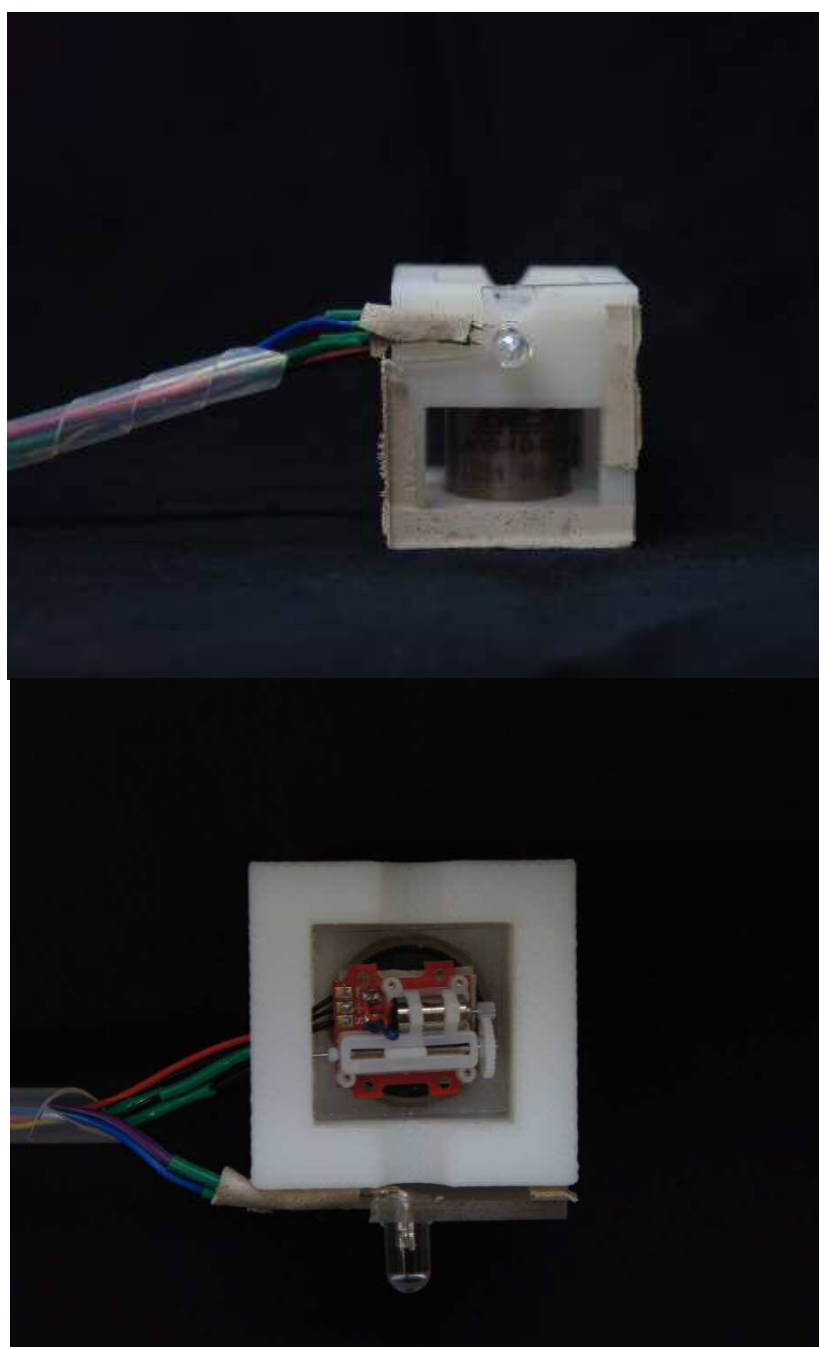


図 4.5 第 2 試作デバイスの概観

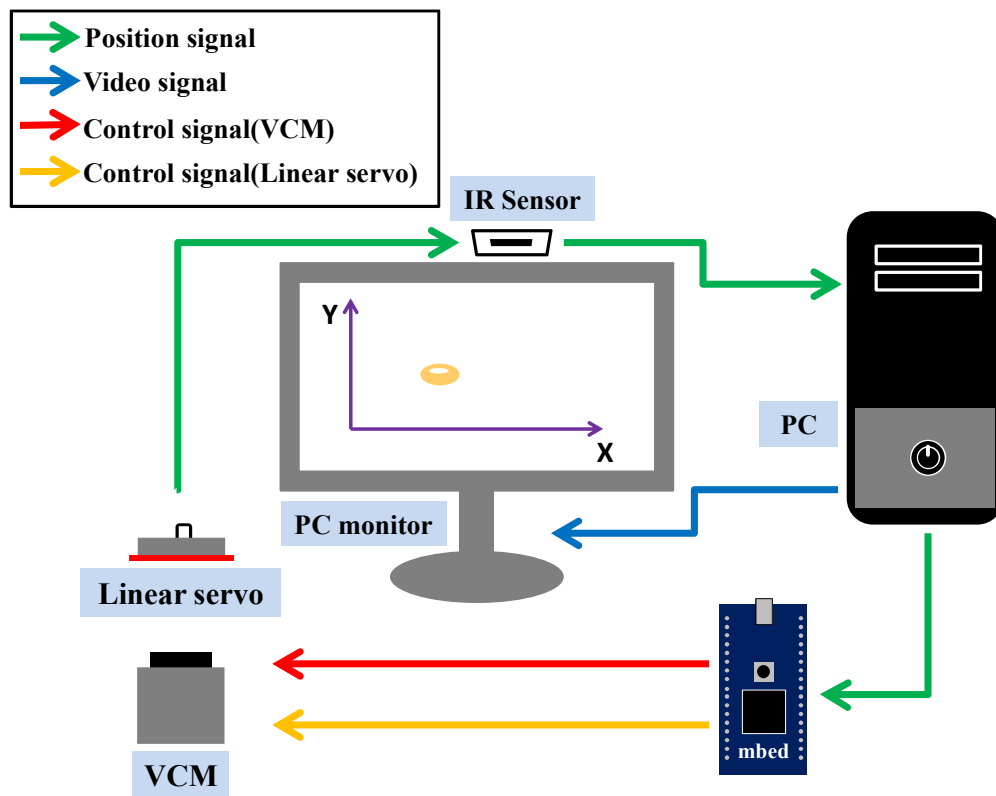


図 4.6 第 2 試作のシステム構成図

このデバイスを本学のオープンキャンパスや学会などで展示発表を行ったところ、体験者からは「本物のテーブルを触っているようだ」、「指が本当に滑っている感じがする」などの好意的な意見が得られた。しかしその一方で、「不自然な振動を感じる」、「時間遅れが気になる」といった声も聴かれた。このことから、本デバイスで用いたサーボモータ、並びに位置センシング方式に問題があると考えた。

リニアサーボモータはギアを含んだ機構を持ち、駆動の際にはギアがかみ合って動作することによる振動が発生する。これは予期することのできない、制御不能の振動であり、触覚呈示において不自然さを感じさせる要因となりうる。また、応答性にも欠けるため、本デバイスで想定しているような、位置情報とアクチュエータの駆動をリアルタイムに同期させるシステムにおいては不適切であることがわかった。さらに、このリニアサーボは速度などに応じた細かな制御が不可能であるため、再現することが出来る摩擦感の高品位とは言えない。

さらに、今回用いた位置センシング方式は Wii リモコンによる PC を介したものであったが、マイコンのデータの更新レートに対し Wii リモコンのループ速度が遅かったため、こちらもシステム全体の遅延の原因になったと考えられる。

これにより、本試作における改善すべき点は①水平方向の駆動により応答性に優れ、

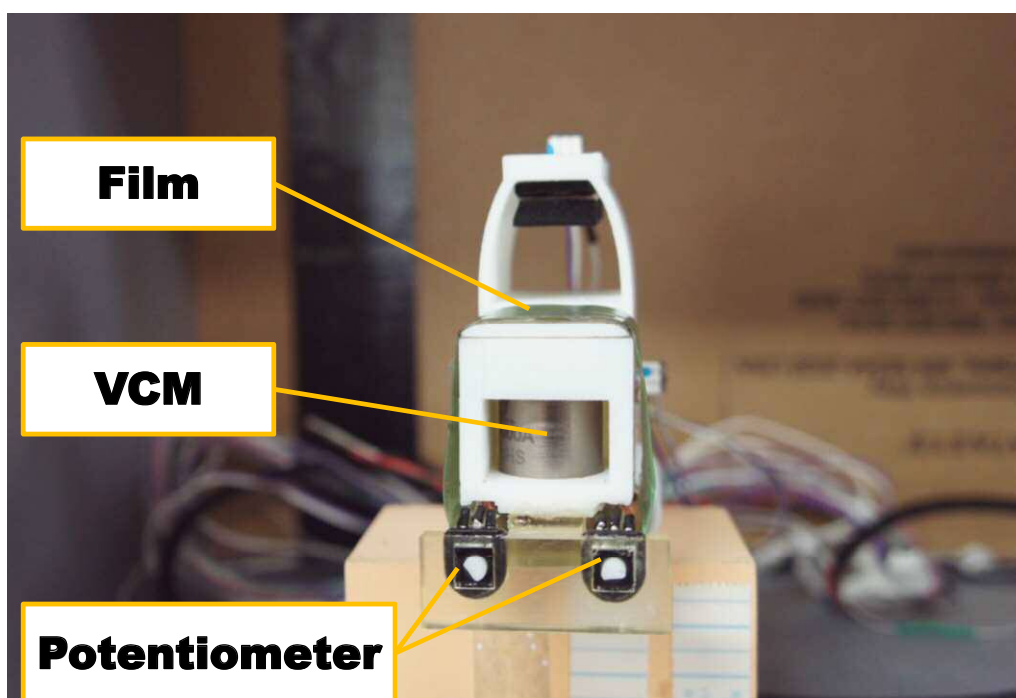
細かな制御が可能なアクチュエータを用いること、②PC を介さない位置検出方式を採用することであると考えた。

4.2 第3 試作デバイス

前節で述べたデバイスは、ポータビリティに優れたものであったものの、応答性などの面では触覚呈示に適しているとは言えなかった。そこで第3 試作では、前節で挙げたアクチュエータ並びに位置検出方式の応答性の問題を踏まえ、新たなデバイスを製作した。本節ではその設計論および動作原理について述べる。

4.2.1 デバイス概要

図 4.7 にデバイスの概観を示す。ここでは Gravity Grabber[22]の機構を援用した。本デバイスは垂直方向運動のためのボイスコイルモータ（以下、VCM）(LA08-10-000A, BEI KIMCO MAGNETICS 社製)と水平方向運動のためのポリイミドフィルム(Kapton100H, 東レデュポン社製)が取り付けられたギアヘッド付き（減速比 4.1:1）の DC モータ(3W, Maxon 社製)2 台から構成される。前者は皮膚の接地・非接地を実現すると共に摩擦によって生じる振動を呈示し、後者は指先に水平方向の皮膚変形を起こすことによって摩擦感の一要素である抵抗力を呈示する。



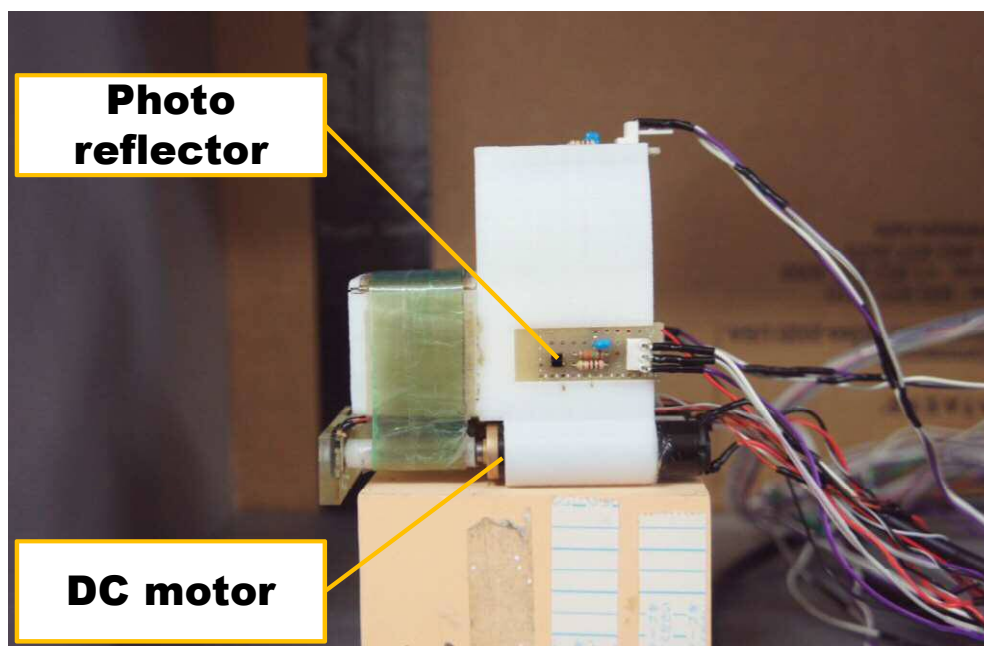


図 4.7 第3 試作デバイス概観

システム構成図を図 4.8 に示す。DC モータの回転軸にはロータリーセンサが取り付けられ、DC モータの回転角度を読み取る。角度の情報はマイコン(mbed NCP LPC 1768, NXP Semiconductors 社製)に送られ、フィルムの移動量が計算される。また、デバイスの上左右には4つのフォトリフレクタが搭載されている。図 4.9 の使用環境のイメージに示されるように、再帰性反射材を貼り付けた箱の中で操作することにより、フォトリフレクタが箱の壁面との距離に応じた反射光を検出する。ここでは上下、並びに左右の反射光強度の差分から現在位置が計算され、各アクチュエータはこれに基づいてそれぞれ駆動される(図 4.10)。

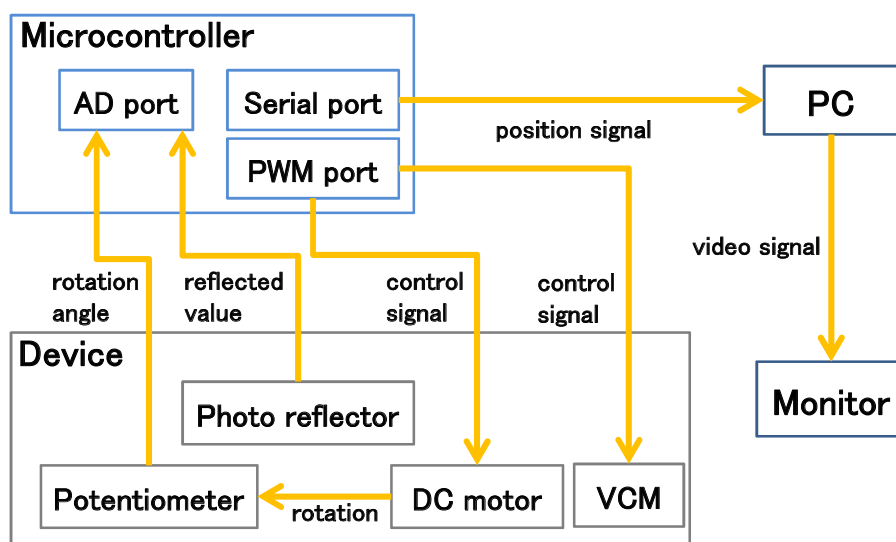


図 4.8 第3 試作のシステム構成図

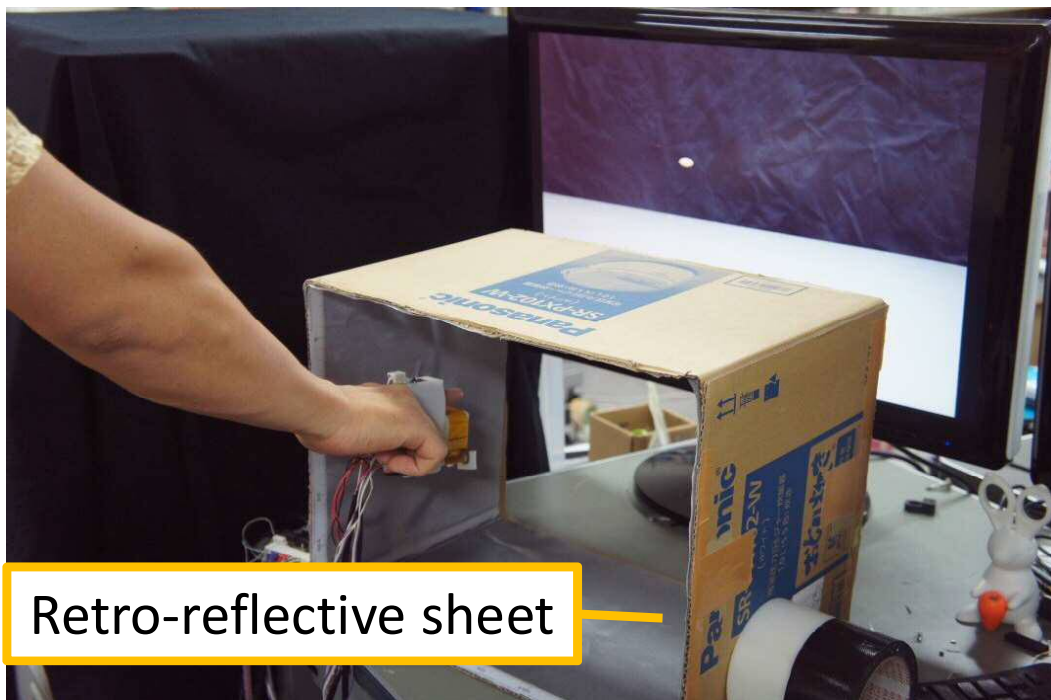


図 4.9 デバイス使用環境のイメージ

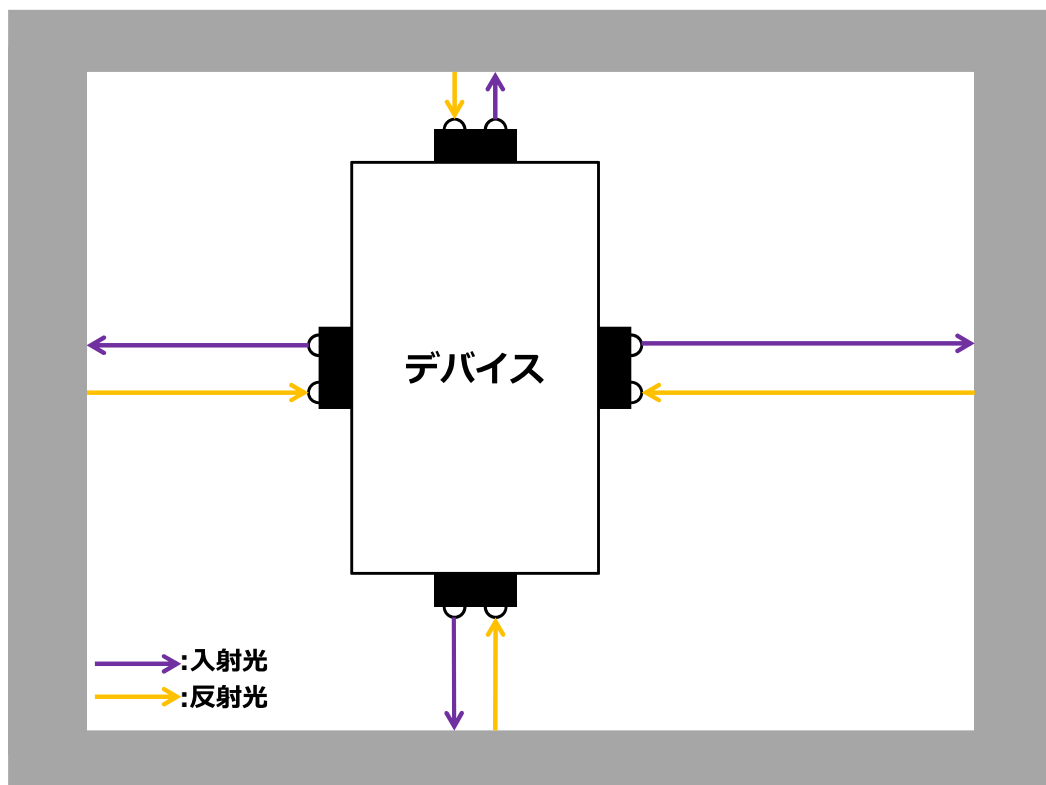
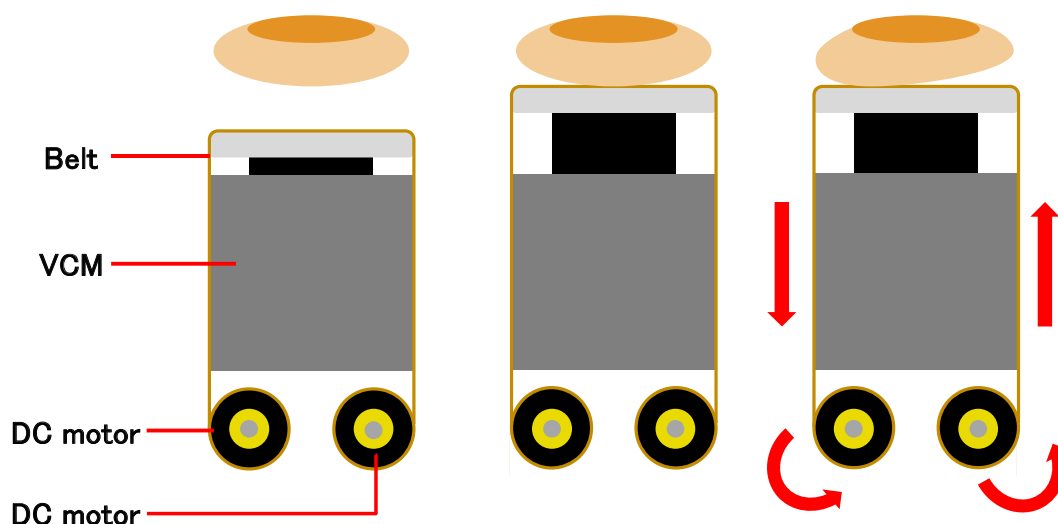


図 4.10 反射光強度の差分による位置検出 壁に近いほどフォトリフレクタが読み取る反射光強度は強くなる

まず指先の垂直位置と平面との距離に応じて VCM が駆動され、平面に指が接地する

と VCM は実際の指に接触を開始する。この状態で指を横に動かすと DC モータが駆動され、移動方向とは逆向きにフィルムが並進運動を開始し、指先に皮膚変形を与える。以上の仕組みにより、ユーザはバーチャルな平面からの摩擦感を感じることが出来る。

このシステムにおける改善点は次のとおりである。第一に位置検出に関して従来の PC に接続するセンシングシステムではなくマイコンのみを用いるので、計測—制御ループを 10kHz 以上にすることが出来る。本計測原理は板による風センシング等に利用されているが[28]、空中で用いる触覚ディスプレイで利用することで制御ループを早めたのは私の知る限り初めてである。第二に DC モータを使用しているため、以前の施策で用いたリニアサーボよりも応答性に優れている。第三にフィルムを使用することにより VCM および DC モータはフィルムのみ駆動できるため非常に軽く、高速な応答が可能である。フィルムを DC モータ等で巻き取るポータブルデバイスはすでにいくつか提案されているが[22][17]、フィルムの裏側から VCM で「叩く」ことで皮膚の水平・垂直変位と共に高周波振動呈示も行っている例は私の知るかぎり初めてである。



→: Motion direction of belt

図 4.11 第 3 試作の動作原理（左）非接地の場合（中央）平面に接地した場合（右）接地した状態で指を横にスライドさせた場合

4.2.2 各アクチュエータの出力の最適化

ここでは、図 4.12 に示すような本機構のモデルについて記す。

DC モータ(M1, M2)に取り付けられたフィルムがある量だけ巻き取られる場合を考える。

いま、点 P の現在位置を xd 、目標位置を x とおき、その差分を

$$s = x - xd \quad (1)$$

とすると、水平方向への力は、

$$F_x = P_x s - D_x \dot{s} \quad (2)$$

となる（ただし、 $F_x > 0$, P_x, D_x : 比例定数）. ここで、フィルムとデバイス表面との間の摩擦を無視すると、垂直方向にある力でフィルムを引っ張ると水平方向にも同じだけの力が働くと考えられる. M1, M2 が同じ方向に駆動されるとすると、 F_x と 2 つのモータの出力 F_{M1}, F_{M2} との間には次のような関係が成り立つ.

$$F_x = F_{M1} + F_{M2} \quad (3)$$

このとき、デバイスの駆動の際にフィルムの弛みを防ぐために引張力 T をかけることを考えると、 F_{M1}, F_{M2} を用いて、

$$T = F_{M1} - F_{M2} \quad (4)$$

と表せる. デバイス駆動の際、 F_{M1}, F_{M2} は互いに逆向きに働くので、 F_x, T はそれぞれ、

$$F_x = F_{M1} - F_{M2} \quad (5)$$

$$T = F_{M1} + F_{M2} \quad (6)$$

となる.

よって、 F_{M1}, F_{M2} はそれぞれ、

$$F_{M1} = (F_x + T)/2 \quad (7)$$

$$F_{M2} = (T - F_x)/2 \quad (8)$$

となり、それぞれのモータから出力されるべき力がわかる.

同様に、VCM によって垂直方向に力を加え、接触子がある量だけ押し上げられる場合を考える.

目標位置の座標 y に対し、点 Q の現在位置 yd との差分を

$$t = y - yd \quad (9)$$

とおくと、垂直方向にかかる力 F_y は

$$F_y = P_y t - D_y \dot{t} \quad (10)$$

と表せる（ただし、 $F_y > 0$, P_y, D_y :比例定数）.

VCM の出力を F_{VCM} 、引張力 T' をかける際の DC モータの出力をそれぞれ F'_{M1} 、 F'_{M2} とおくと、 F_y 、 T' はそれぞれ、

$$F_y = F_{VCM} - (F'_{M1} + F'_{M2}) \quad (11)$$

$$T' = F_{VCM} + (F'_{M1} + F'_{M2}) \quad (12)$$

とかける（ただし、 F_{VCM} 、 F'_{M1} 、 F'_{M2} 、 $T' > 0$ ）. よって、 $F'_{M1} + F'_{M2}$ を F_M とおくと、

$$F_{VCM} = (F_y + T')/2 \quad (13)$$

$$F_M = (T' - F_y)/2 \quad (14)$$

となり、それぞれのアクチュエータから出力されるべき力がわかる.

また、このとき接触子が傾かずに引き上げられる場合は $F'_{M1} = F'_{M2}$ であると考えることができ、それぞれの力は

$$F'_{M1} = F'_{M2} = (T' - F_y)/4 \quad (15)$$

となる.

以上のような定式化から、平面との接地・非接地条件の呈示並びに指の進行方向とは逆の皮膚変形呈示の際の力がわかる. 今回の試作では、 $P_x=0.6$ 、 $D_x=1.0$ 、 $P_y=0.95$ 、 $D_y=1.5$ 、 $T=0.963(\text{mNm})$ 、 $T'=1.926(\text{mNm})$ とし、それぞれの出力を変化させた.

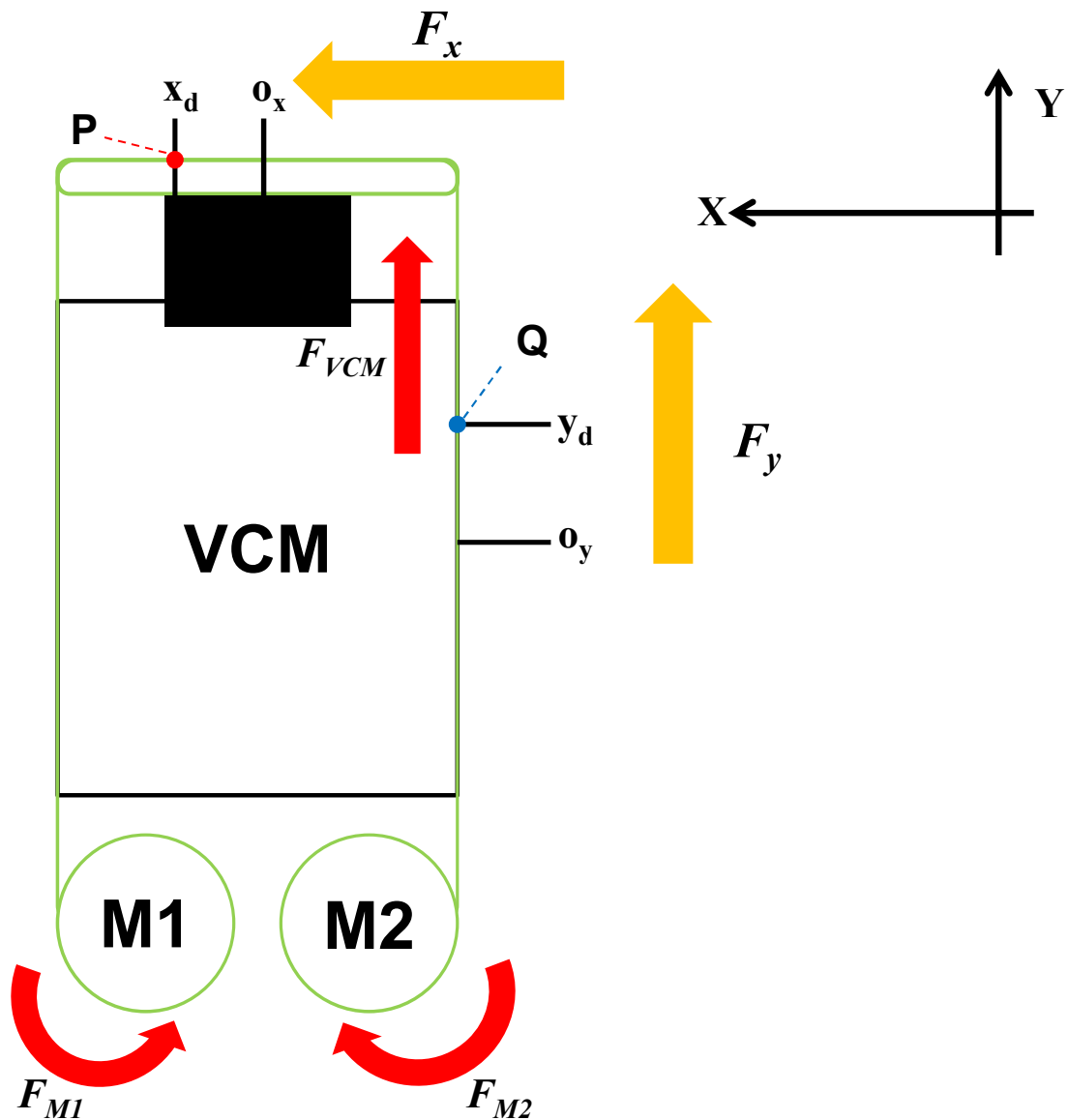


図 4.12 デバイスのモデル図

4.2.3 位置センシング

本システムでは、上下、左右それぞれにおける反射光強度の差分を距離に反映させているが、このときの距離の算出方法について述べる。

今回、得られた曲線を近似するための手法として3次スプライン補間を用いた。これは、 n 個の各区間の曲線の3次関数をつなぎ目が滑らかになるように求める手法である。例として、あるデータ点の区間 s_{j-1} 、 s_j の曲線 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ を考える。このとき、区間のつなぎ目が滑らかになるとは、各曲線の $x = x_j$ における微分係数 $f'_1(x_j)$ 、 $f'_2(x_j)$ が

$$f'_1(x_j) = f'_2(x_j) \quad (16)$$

という関係を満たすことである。これを全区間に適応させていくと、図 4.12 のような滑らかな曲線が得られる。

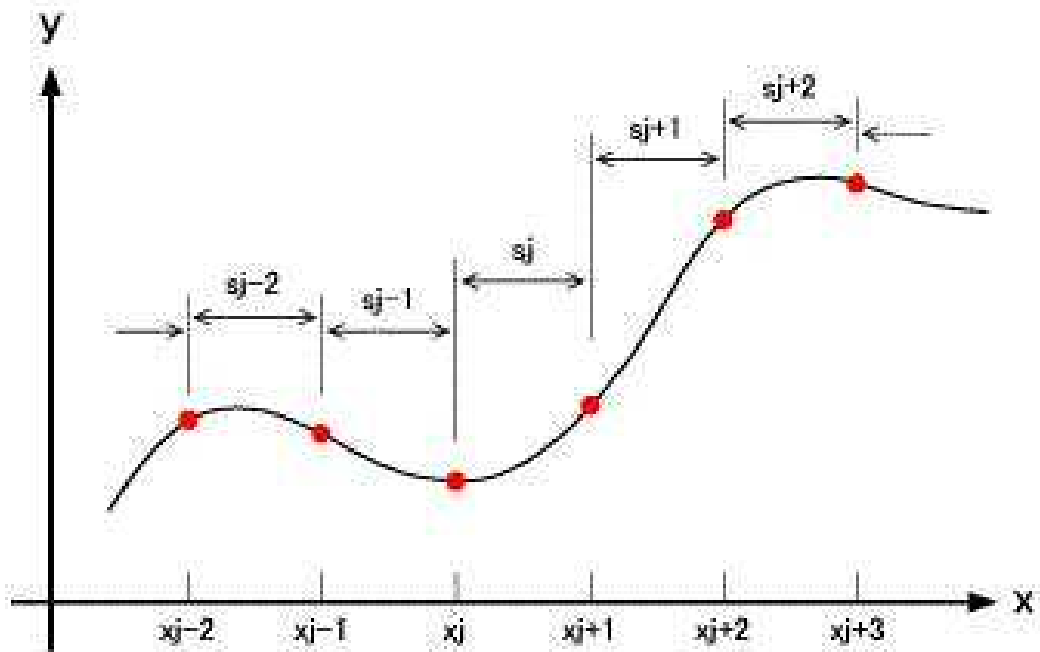


図 4.13 3 次スプライン補間によって得られた曲線[41]

第5章 性能の評価

前章では、皮膚変形と振動の両者が呈示可能であり、遭遇型の機構を取り入れたデバイスの設計・動作原理について述べた。本章では、製作したデバイスの基本的な性能の評価について記す。

5.1 位置検出精度検証

前章でも述べたように、本提案システムでは位置センシングに再帰性反射材とフォトリフレクタを用いることで制御ループの高速化を行っている。ここでは本位置センシング手法の精度を検証する実験を行った。

まずデバイスを箱の左端地点にとどめ、その際の左右のフォトリフレクタから出力される電圧値の差分を10回記録した。その後デバイスを1cmずつ右に動かし、同様に値を記録した(図 5.1)。

結果を図 5.2 に示す。横軸はデバイスの移動距離、縦軸は電圧値の差分、エラーバーは各計測位置における最大誤差を表す。箱の中ではデバイスが横方向において 28.6cm の範囲で操作可能であったため、移動距離は 28cm を最大とした。各計測地点においてすべてのデータ点が $\pm 0.015\text{V}$ の範囲内に収まっており、距離に換算すると中央付近で約 0.8mm、両端では約 0.4mm の誤差であることを確認した。よってこのセンシング方式により、1mm 以下の誤差範囲内での距離の算出が可能であると考えられる。

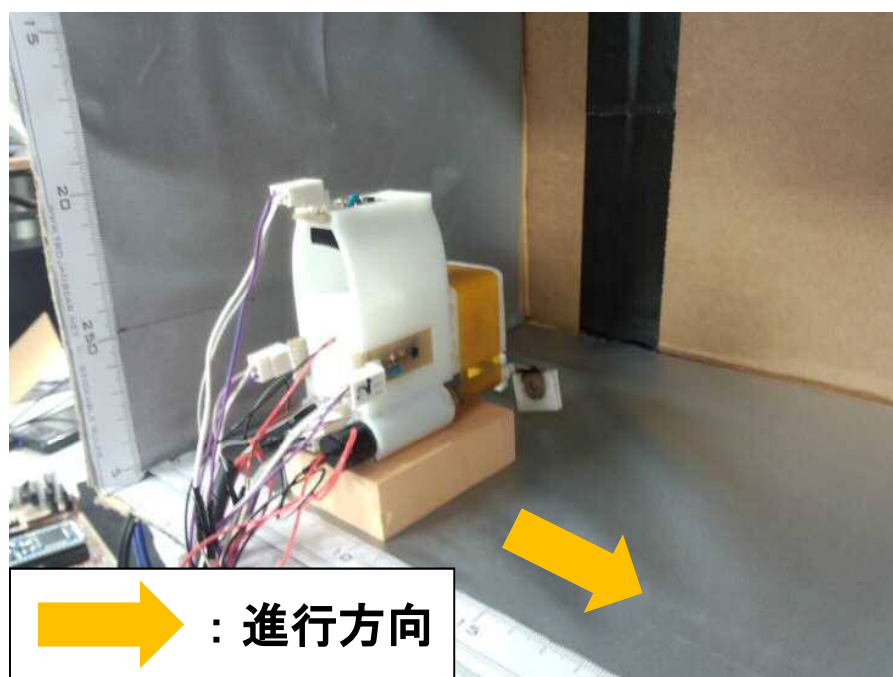


図 5.1 実験の様子

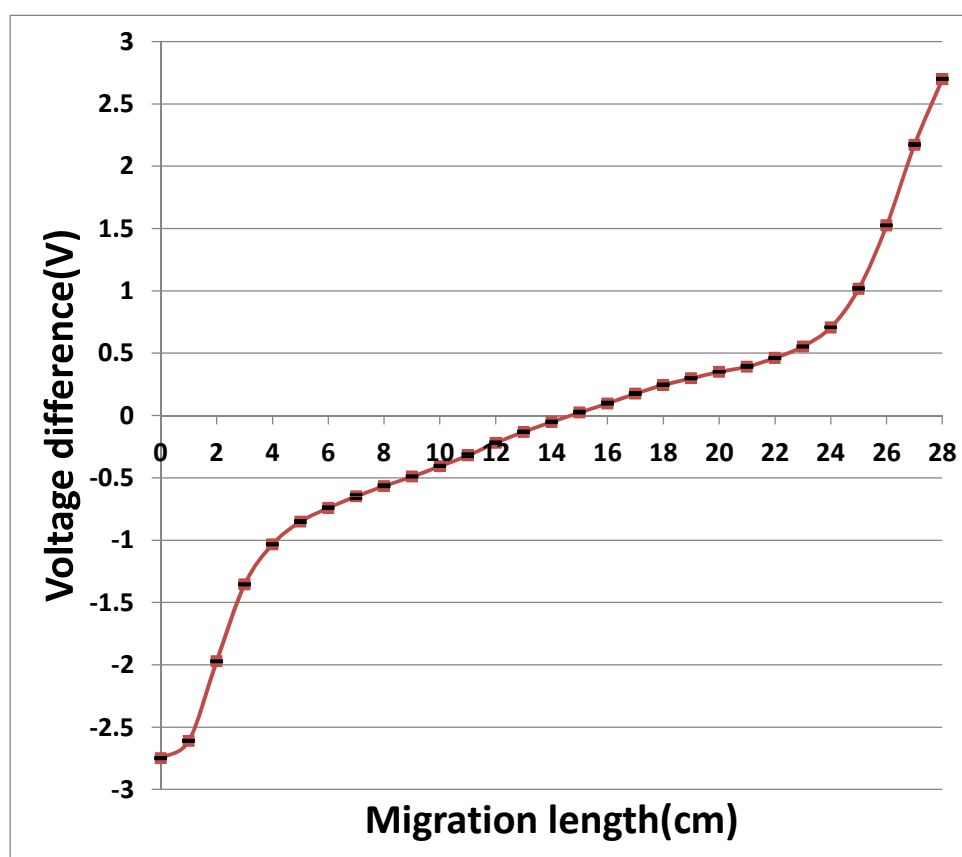


図 5.2 位置検出精度検証結果

5.2 水平方向の応答性の検証

次に、水平方向への応答性を検証するための実験を行った。

まず、50-100g 重の力を電子ばかりで体験したのち、デバイスを装着した。その後、体験した力と同じと思われる強さで指をデバイスの接触子に押し付けた。この状態で DC モータがフィルムを 5mm 巻き取るように、つまり指先の皮膚変形が 5mm 発生するように出力を調整した。尚、フィルムがたるむことがないよう、あらかじめ引張力をかけた状態で実験を行った。

結果を図 5.3 に示す。横軸は経過時間、縦軸はフィルムの巻取り量を表す。実線で描画された入力値に対して、点線のような出力結果が得られた。この図より、本システムは水平方向の駆動において目標値に達するまでに約 40ms の時間を要することが分かった。

今回呈示した皮膚変形は 5mm であり、平面からの抵抗を非常に強く感じる変位量であったと言える。一方、実際に指を平面上で動かす際に生じる皮膚変形はこれよりも小さい値であると考えられる (1mm 程度)。また、本実験のセットアップとは異なるが、

水平方向に指を動かすというタスクにおいて、その動きに応じた触覚を呈示する際に40msまでの応答時間ならばユーザは遅延をほとんど感じないという報告がある。したがって今回の結果から、本システムは水平方向に対して遅延を感じないだけの十分な応答性を持っている可能性が示唆されたと考えられる。

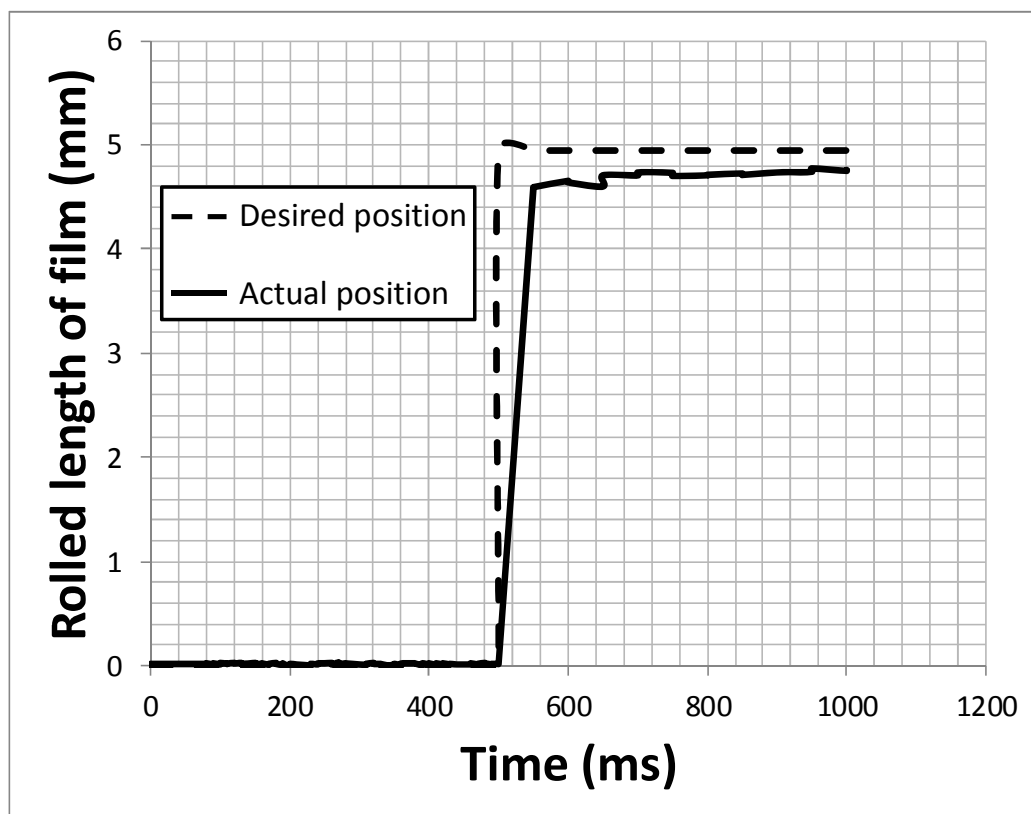


図 5.3 応答性検証結果

5.3 固定された平面の表現

今回製作したデバイスは、バーチャルな平面に指を接地させ、その状態で横にスライドさせるという一連の流れによって摩擦感を知覚する触覚インタラクションを想定している。本来、実世界において平面は固定されており、動くことはない。つまり、垂直方向においては指が下向きに運動した分だけ平面に近づく、水平方向においては指が左右に運動した分だけ平面上のある点が遠ざかるという現象が起きている。したがって、デバイスの動作においては実世界の平面を再現する為に、これらのような現象を再現する必要があると考えた。本節では、このような固定された平面の表現について述べる。

ここではデバイスを前後、左右それぞれの方向へ往復させ、その様子をカメラで撮影することでフィルムに付けた印が定位置にどの程度留まるかを確かめた。実験の様子を

図 5.4 に示す．デバイスを動かす速さは 1 秒間に 1 往復 (1Hz)、撮影の際のシャッタースピードは 5.5.frame/s であった．なお、デバイスは前章で述べたモデルに基づいて駆動された．



図 5.4 実験の様子

結果を図 5.6、図 5.6 に示す．前者は水平方向の、後者は垂直方向の動作を撮影したものである．目印は赤いテープで表されている．両者ともに目印が図中の点線上から大きく外れている様子が少ないことから、デバイスの駆動によって固定された平面を概ね再現できており、本デバイスで想定しているような指をバーチャルな平面の高さまで下ろし、指を横に運動させると摩擦を知覚するという 2 次元的な触覚インタラクションにおいては平面からの自然な抵抗感を体験することが出来ると考えられる．

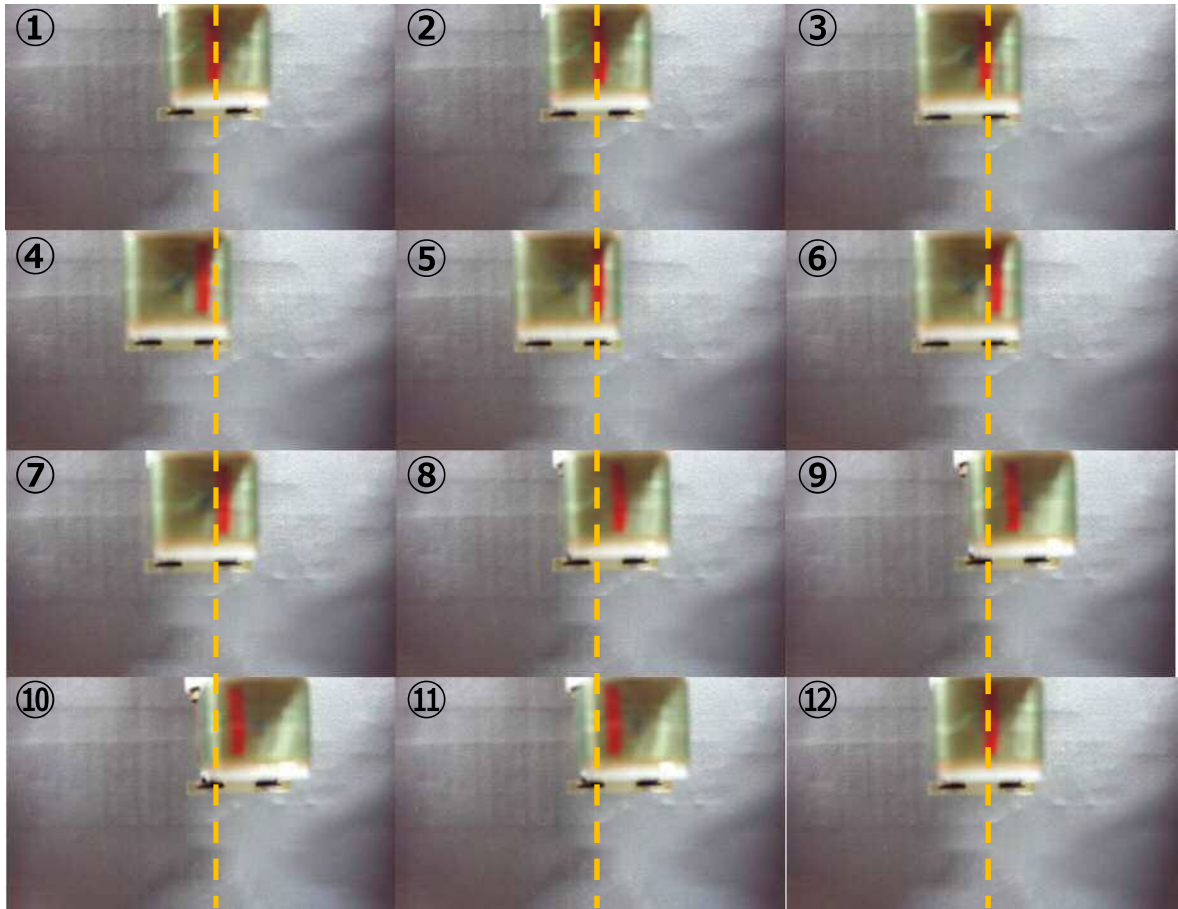


図 5.5 水平方向の動作

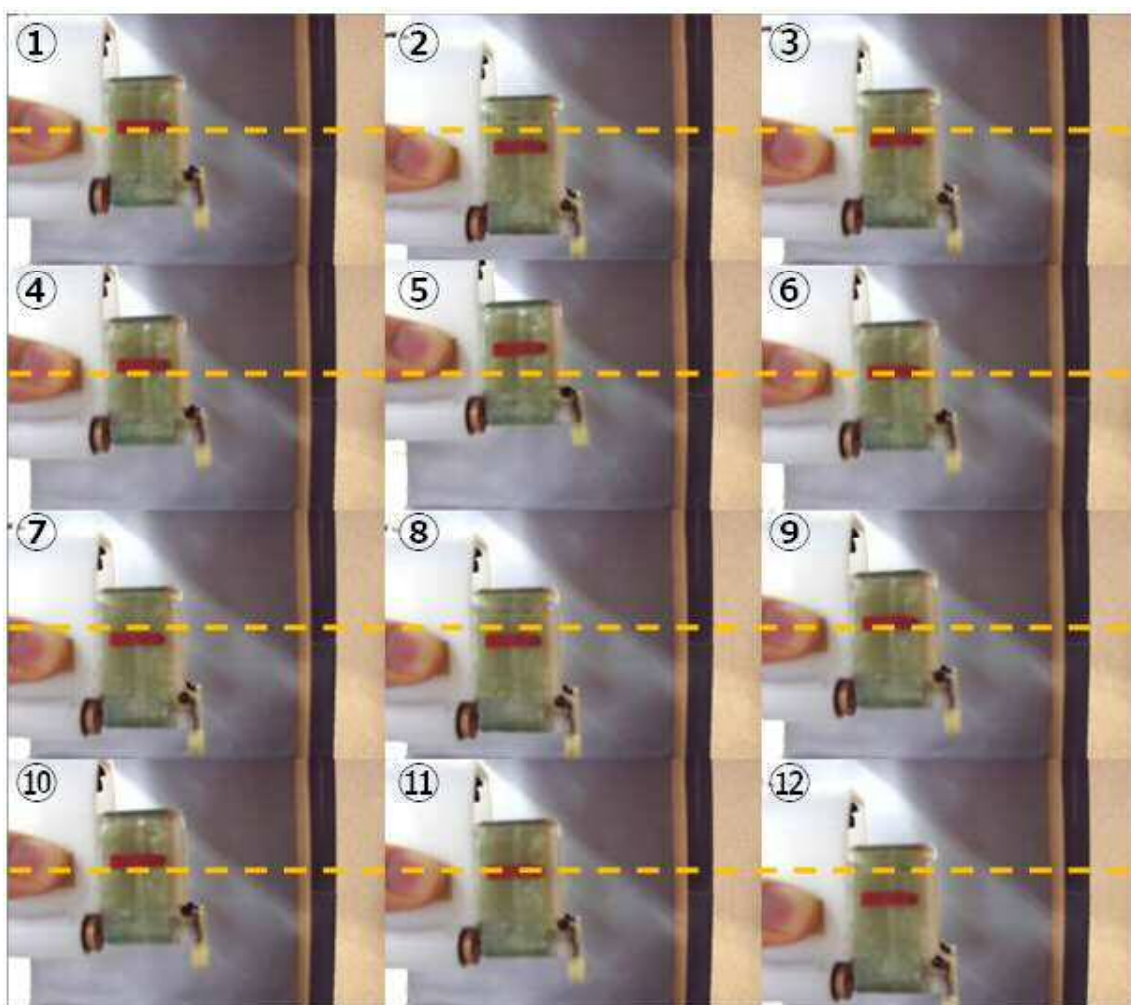


図 5.6 垂直方向の動作

第6章 結論

本研究では高品位な摩擦感呈示を目指し、装着型の遭遇型触覚呈示デバイスを提案した。まず第1章から第3章にかけては背景、先行研究を通して本研究の立ち位置を明確にした。

第4章では広帯域性、多方向性、遭遇型という3つの設計指針に基づいたウェアラブルデバイスの設計論について述べた。第1、第2試作で用いたリニアサーボモータは非常に軽量なため、簡便な実装を実現する為には適切であったが、応答性に欠け、予期しない振動がユーザの不快に直結するため、触覚呈示には不適切であった。これに対し、第3試作で用いたDCモータは応答性に優れ、また不快な振動も生じにくいいため、本研究で目指すような摩擦感提示には適していたと考えられる。ただし、デバイス自体はその分重量が増したため、体験の形態によっては（例えば空間中でデバイスを装着している手を3次元的に動かすなど）運動を妨げてしまう恐れがある。実際に数人の被験者にデバイスを装着させた結果、重さが気になるという意見は特に聞かれなかったが、今後はより軽量のアクチュエータを用いてさらに簡便化を図り、体験を制限しないような設計を検討していく必要がある。

第5章の第1節では、デバイスの応答性および位置検出の精度について評価を行った。その結果、このデバイスは指令値に対して40msの応答時間を要し、かつ1.0mm以内での位置検出が可能であることがわかった。これらの性能は、本研究で想定しているような平面の高さまで指を下ろし、その状態でスライドさせるという2次元的な触覚インタラクションにおいては十分であると考えられる。しかし、例えばデバイスをロボットハンドの操作などに応用する場合、精密な操作が可能になるようにより精度を高める必要があるといえる。第2節では実世界に存在する固定された床の再現を試みた。フィルムに付けられた目印がどの程度定位置に留まるかを検証した結果、大きくばらつく様子は特に見られなかったため、実世界での指と平面との間の関係を再現できていたと考えられる。このような平面を再現するような接触子の制御は、平面の凹凸や硬軟感の変調にも応用できるといえる。

今回の評価によって、皮膚変形呈示ならびに平面との接地・非接地状態の呈示について十分な性能を持つ可能性が示唆されたため、今後は振動呈示によるテクスチャ感の再現についても評価を行う必要がある。具体的には、いくつかの素材をなぞった際の振動を記録したものをモデリングしたのちに再生し、その振動と実際の素材を被験者が合致させることが出来るかを検証していく。この有効性が示されれば、様々なテクスチャ感の高品位な提示が可能になると考えられる。

謝辞

遡ること学部3年次の12月、研究室配属のための面談で梶本先生にコテンパンに叩きのめされたことからすべては始まりました。面談ではなく説教の場になってしまったことはとても情けなく感じたのですが、一番悔しかったのは突き刺さる言葉の一つ一つに何も言い返すことが出来なかったことです。思えばこのときの悔しさが、私の研究を進めていくモチベーションの一つになったのではと感じています。

あれから4年、私は今この文章を書きながらかつての自分を思い出しています。3年間の研究生活を通して本当に自分は成長できたのかと問われれば、「よくわからない」というのが正直な感想です。しかし、学部時代2回の留年を経験してもなお単位に困っていた頃に比べれば随分ましになったのかもしれません。特に、研究を通じて物事の考え方が再構成されたという点は私の中で非常に大きな財産になっています。これもひとえに主任指導教員である梶本先生の貴重なアドバイスのおかげです。先生の指導は、どれをとってもその場限りではない、一生モノのご教授でした。常に我々の先頭に立ち続ける先生の姿は研究者としてはもちろん、一人間としても尊敬できる師匠そのものです。

ある時は心強い上司として、またある時は気軽に話せる兄貴分として指導して下さった研究室 staffs の佐藤未知先輩、蜂須拓先輩、岡崎龍太先輩、そして現在東京大学 PD の福島政期先輩には、本当にお世話になりました。先輩方の、絶妙なタイミングで声をかけてきてくださるその察知能力はお見事としか言いようがありません。

私の直属についてくれた後輩の加藤愛実さん、中村拓人君には指導が至らずご迷惑をかけてしまうことがありました。しかし、お二人のような優秀な後輩を持てて本当に良かったです。私のアドバイスは少しでも参考になったでしょうか？もしそうならば幸いです。君たちの真摯な態度には学ばされるものがとても多かったです。

本テーマを始めるきっかけになった PECRO lab の Antonio Frisoli 先生、Massimiliano Solazzi 先生、Daniel Leonardis 博士には留学中公私ともに様々な面でご支援いただきました。初めての海外生活で戸惑いが多い中、研究に打ち込むことが出来たのは皆様のおかげです。心より感謝しています。Sono granto a tutti voi. Grazie mille.

同期の栗原洋輔君、渡辺亮君へ、おそらく、近いうちまたどこかで会うことでしょう。よって割愛！というのは嘘で、どれだけ忙しい中でも励ましあいながら乗り越えられたのは本当に信頼できる戦友がいたからだと思います。私にとっての同期は、単なる遊び友達ではなく共に論じ合うことが出来る大切な仲間です。

最後に、度重なる不祥事にも関わらず私にここまで投資をしてくれた両親に感謝の意を表しつつ、締めとさせていただきます。皆様、ありがとうございました。

参考文献

- [1] Asano, S., Okamoto, S., Matsuura, Y., Nagano, H., Yamada, Y., “Vibrotactile Display Approach that Modifies Roughness Sensations of Real Textures”, *21th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication(RO-MAN 2012)*, pp1001-1006, 2012, IEEE
- [2] Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A., & Harrison, C., “TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces”, In *Proceedings of the 23nd annual ACM symposium on User interface software and technology* (UIST 2010), pp. 283-292, 2010
- [3] Ben Porquis, L., Maemori, D., Nagaya, N., Konyo, M., & Tadokoro, S., “Haptic cue of forces on tools: Investigation of multi-point cutaneous activity on skin using suction pressure stimuli”, In *Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 2023-2029, 2013, IEEE.
- [4] Bicchi, A., De Rossi, D. E., Scilingo, E. P., “The Role of the Contact Area Spread Rate in Haptic Discrimination of Softness,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 16(5), pp. 496-504, 2000.
- [5] Chinello, F., Malvezzi, M., Pachierotti, C., Prattichizzo, D., “A three DoFs wearable tactile display for exploration and manipulation of virtual objects”, *IEEE Haptics Symposium*, pp71-76, 2012
- [6] CyberTouch
<http://cybertouch.com/index.html>
- [7] Frisoli, A., Solazzi, M., Salsedo, F., & Bergamasco, M., “A fingertip haptic display for improving curvature discrimination”. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 17(6), pp550-561, 2008
- [8] Fujimoto, I., Yamada, Y., Morizono, T., Umetani, Y., & Maeno, T. “Development of artificial finger skin to detect incipient slip for realization of static friction sensation”. In *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, MFI2003. Proceedings of IEEE International Conference on*, pp. 15-20, 2003
- [9] Fujita, K., Ohmori, H., Katagiri, H., “Development of Softness Display Device Based on Fingertip Contact Area Control,” *Proc. the Virtual Reality Society of Japan Fifth Annual Conference*. pp. 251-254, 2000.
- [10] Gleeson, B. T., Horschel, S. K., & Provancher, W. R. “Perception of direction for applied tangential skin displacement: Effects of speed, displacement, and repetition”. *Haptics, IEEE Transactions on*, 3(3), 177-188, 2010
- [11] Guinan, A. L., Caswell, N. A., Drews, F. A., & Provancher, W. R., “A video game controller with skin stretch haptic feedback”. In *Consumer Electronics (ICCE), IEEE International Conference on*, pp. 456-457, 2013
- [12] Guinan, A. L., Hornbaker, N. C., Montandon, M. N., Doxon, A. J., & Provancher, W. R. “Back-to-back skin stretch feedback for communicating five degree-of-freedom direction cues”, In *World Haptics Conference (WHC)*, pp. 13-18, 2013
- [13] Guinan, A. L., Montandon, M. N., Caswell, N. A., & Provancher, W. R., “Skin stretch feedback for gaming environments”, In *Haptic Audio Visual Environments and Games (HAVE), IEEE International Workshop on*, pp. 101-106, 2012
- [14] Gwilliam, L. T., Doxon, A. J., & Provancher, W. R., “Haptic matching of directional force and skin stretch feedback cues”, In *World Haptics Conference (WHC)*, pp. 19-24, 2013
- [15] Intuitive Surgical, Inc.
<http://www.intuitivesurgical.com/>
- [16] Jeka, John J.; Lackner, James R. “The role of haptic cues from rough and slippery surfaces in human postural control”, *Experimental Brain Research*, 103.2: pp267-276, 1995

- [17] Kimura, F., Yamamoto, A., "Rendering Variable-Sized Lump Sensations on a Softness Tactile Display," *IEEE World Haptics Conference(WHC)*, pp. 97-102, 2013
- [18] Konyo, M., Tadokoro, S., Yoshida, A., Saiwaki, N., "A Tactile Synthesis Method using Multiple Frequency Vibrations for Representing Virtual Touch," *Intelligent Robots and Systems(IROS 2005)*, pp. 3965-3971, 2005
- [19] Kuchenbecker, K. J., Provancher, W. R., Niemeyer, G., & Cutkosky, M. R. (2004, March). Haptic display of contact location. In *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS'04. Proceedings. 12th International Symposium on*, pp. 40-47, 2004
- [20] Kuchenbecker, K. J., Ferguson, D., Kutzer, M., Moses, M., & Okamura, A. M. (2008, March). The touch thimble: Providing fingertip contact feedback during point-force haptic interaction. In *Haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems (haptics 2008)*, pp. 239-246, 2008
- [21] Lisa Skedung, Martin Arvidsson, Jun Young Chung, Christopher M. Stafford, Birgitta Berglund, Mark W. Rutland. "Feeling Small: Exploring the Tactile Perception Limits". *Scientific Reports*, pp1-6, 2013
- [22] Meyer, D. J., Peshkin, M. A., & Colgate, J. E. (2013, April). Fingertip friction modulation due to electrostatic attraction. In *World Haptics Conference (WHC)*, pp. 43-48, 2013
- [23] Minamizawa, K., Fukamachi, S., Kajimoto, H., Kawakami, N., Tachi S., "Gravity Grabber: Wearable Haptic Display to present Virtual Mass Sensation," *ACM SIGGRAPH, ACM Press*, p. 8, 2007
- [24] Nakagawara, S., Kawabuchi, I., Kajimoto, H., Kawakami, N., Tachi, S., "An Encounter-type Multi-fingered Master Hand Using Circuitous Joints," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2005)*, pp. 2667-2672, 2005
- [25] Persson, B. N., "Sliding friction: Physical Principles and Applications," Vol. 1. Springer, 2000.
- [26] Prattichizzo, D., Pacchierotti, C., & Rosati, G., "Cutaneous Feedback as a Sensory Subtraction Technique in Haptics", *IEEE Transaction on Haptics*, pp.289-300, 2012
- [27] Quek, Z. F., Schorr, S. B., Nisky, I., Okamura, A. M., & Provancher, W. R. "Sensory Augmentation of Stiffness using Fingerpad Skin Stretch", *IEEE World Haptics Conference*, pp.467-472, 2013
- [28] Sawada, E., Ida, S., Awaji, T., Morishita, K., Aruga, T., Takeichi, R., and Inami, M., "BYU-BYU-View: A Wind Communication Interface," *ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies*, ACM, p. 1, 2007
- [29] Scheggi, S., Salvietti, G., Prattichizzo, D., "Shape and Weight Rendering for Haptic Augmented Reality", *19th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication(RO-MAN 2010)*, pp.44-49, 2010
- [30] Solazzi, M., Frisoli, A., Bergamasco, M., "Design of a Novel Finger Haptic Interface for Contact and Orientation Display", *IEEE Haptics Symposium*, pp.129-132, 2010
- [31] Solazzi, M., Provancher, W. R., Frisoli, A., Bergamasco, M., "Design of a SMA Actuated 2 DoF Tactile Device for Displaying Tangential Skin Deformation," *IEEE World Haptics Conference*, pp. 31-36, 2011
- [32] Sylvester, N. D., Provancher, W. R., "Effects of Longitudinal Skin Stretch on the Perception of Friction," *IEEE World Haptics Conference*, pp. 373-378, 2007
- [33] Tachi, S., Maeda, T., Hirata, R., Hoshino, H., "A Construction Method of Virtual Haptic Space," *Proceedings of the 4th International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence (ICAT '94)*, pp. 131-138, 1994
- [34] Tsuchiya, S., Konyo, M., Yamada, H., Yamauchi, T., Okamoto, S., & Tadokoro, S. (2009, September). Vib-Touch: Virtual Active Touch Interface for Handheld Devices. In *Robot and Human Interactive Communication, 2009. RO-MAN 2009*, pp. 12-17, 2009
- [35] Yazdian, S., Doxon, A. J., Johnson, D. E., Tan, H. Z., & Provancher, W. R., "2-DOF

- contact location display for manipulating virtual objects”, *World Haptics Conference (WHC)*, pp. 443-448, 2013
- [36] Yokokohji, Y., Kinoshita, J., Yoshikawa, T., “Path Planning for Encountered-type Haptic Devices that Render Multiple Objects in 3D Space,” *Proc. IEEE VR2001*, pp. 271 -278, 2001
- [37] 3D Incorporated
<http://www.ddd.co.jp/phantom/>
- [38] 大山, 今井, 和氣. “新編感覚・知覚心理学ハンドブック”, 誠信書店, pp.1169-1315, 1994.
- [39] 岡本正吾; 昆陽雅司; 田所諭. 1A1-D08 指腹への振動触刺激による力覚の誘発. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2010, 2010.
- [40] 岡本正吾、昆陽雅司、嵯峨智、田所諭、” 皮膚感覚呈示における時間遅れの影響調査と検知限の同定”、第18回ロボティクスシンポジウム講演論文集、pp.153-158、2008
- [41] スプライン補間
<http://www.cannula.jp/hokan.html>